

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Alimentaires
Filière : Sciences Alimentaires
Spécialité : production et transformation laitière



Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Élaboration d'une boisson fermentée à base de légumineuses
en utilisant *Lactobacillus plantarum***

Présenté par :

Salhi salima et Hamlat Souhila

Soutenu le 02 juillet 2025

Devant le jury composé de :

M^{me} Achat Sabiha.....Pr

M^{me} Merzouk Hafida.....MCA

M^{me} Smail LeilaMCB

M^{me} Bensidhoum Sonia.....Doctorante

Président

Encadreur

Examineur

**Co-
encadreur**

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté et de nous avoir béni pour la réalisation de ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre promotrice Mme MERZOUK H. d'avoir accepté de nous encadré, pour son suivi, ses encouragements, ses conseils précieux, ses orientations, nous aimons particulièrement souligner ses qualités humaines, son savoir-faire, son appui moral et sa disponibilité.

Nous souhaitons également adresser nos plus sincères remerciements à Mme BENSIDHOUM S., notre co-encadreur dont la disponibilité et la bienveillance ont été essentielles à l'avancement de ce travail. Sa confiance, ses conseils avisés et son écoute attentive ont enrichi nos réflexions et guidé chaque étape de ce travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble de notre jury, c'est un honneur qu'il ait accepté d'examiner ce mémoire.

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à l'ensemble du personnel du laboratoire **3BS** pour l'aide précieuse qu'il nous a accordé tout au long de ce travail. Leur accueil chaleureux, leur disponibilité constante et leur expertise technique ont été indispensables à la réalisation de ce travail, ainsi qu'à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin sa réalisation*

Salima et souhila

Dédicaces

Je dédie ce travail, à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien merci de m'avoir toujours cru capable d'aller plus loin. Votre confiance et vos encouragements ont été ma plus grande force.

À mes chers frères, Mahdi et Chouaib. Merci pour votre présence, et votre confiance en moi vous avez été toujours été un repère et un soutien précieux.

À ma chère sœur Nawal et ma belle-sœur Mouni

À mon neveu Abdanour et mes nièces Ania et Ritedj

A mon cher cousin Yacine qui est toujours à mes côtés et ma cousine Lamia et à tous ceux qui me sont chers toute ma famille paternelle et maternelle.

A mes chère copines Siham et Djidji.

Souhila

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à :

Mes très chers parents qui ont toujours été de cœur avec moi. Je ne saurais jamais vous remercier assez. Qu'Allah vous gardent longtemps avec nous.

Trouvez en ce modeste travail un début de récompense de vos sacrifices.

*A mes très chers frères et à mes soeurs pour leurs encouragements permanents,
et leur soutien moral.*

*A tous ceux qui m'ont soutenu et aidé pour la réalisation de ce modeste travail
et tous ceux qui me sont chers.*

Salima

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Table des matières

Introduction	1
---------------------------	----------

Synthèse bibliographique

I- Généralités sur les légumineuses

I.1.Généralités.....	3
I-2-Structure et morphologie	3
I-3-Composition chimique et valeur nutritionnelle	4
I-4- Quelques types de légumineuses	5
I-4-1-Pois chiche.....	5
I-4-1-1-Définition.....	5
I-4-2-Variétés.....	6
I-4-3-Composition chimique et valeur nutritionnelle.....	6
I-5-1-Féverole.....	7
I-5-1-Définition.....	7
I-5-2-Variétés.....	7
I-5- 3-Composition chimique et valeur nutritionnelle.....	8
I-6- Différents procédés d'élimination des facteurs antinutritionnels	9
I-6-1-Procédés thermiques.....	9
I-6-2- Trempage	10
I-6-3- Germination	10
I-6-4-Fermentation.....	10
I-7-Bienfaits des légumineuses sur la santé.....	10

II-Boissons végétales fermentées

II-1-Fermentations alimentaires.....	12
II-1-Définition.....	12
II-1-2- Historique.....	13
II-2-Intégration des légumineuses dans la boisson fermentée et leurs avantages	13
II-3-Impacts de la fermentation sur la composition nutritionnelle et les propriétés sensorielles des boissons végétales.....	14
II-4-Principaux micro-organismes utilisés dans la fermentation des aliments.....	15
II-4-1-Bactéries.....	16
II-4-2-Levures.....	18
II-4-2-Moisissures.....	18
II-5-Bienfaits de la fermentation des fruits et légumes.....	18

Partie expérimentale

Matériel et méthodes

I-1-Matériel végétal	19
I-2- Développement des boissons	19
I-2-1- Préparation de l'inoculum pour la fermentation.....	19
I-2-2-Préparation des boissons.....	20
I-3-Optimisation de la formulation de la boisson	20
I-3-1-Plan de mélange D-optimal.....	20
I-4-Caractérisation physico-chimique des boissons.....	21
I-4-1-Mesure du pH.....	21
I-4-2-Acidité titrable.....	21
I-4-3-Mesure rhéologique	21
I-4-4-Dosage des protéines.....	22
I- 5-Caractéristiques phytochimiques des boissons.....	22
I-5-1-Extraction des composés phénoliques totaux.....	22

I-5-2-Dosage des polyphénols	22
I-5-3-Essai de piégeage du radical DPPH.....	23
I-6-Dénombrement des bactéries lactiques.....	23
I-7-Analyse sensorielle.....	24
I-8- Analyse statistique.....	24

Résultats et discussion

I.1. Optimisation des conditions de formulation optimales de la boisson protéique...25	
I.1.1. Modélisation et ajustement du modèle.....	25
I.1.2. Analyse de triangle de mélange.....	32
I.1.3. Validation et vérification du modèle prédictif.....	33
I.2. Analyse sensorielle.....	38
I.2.1. Caractérisation de produit	38
I.2.2. Cartographie externe de préférence (PREFMAP).....	39

Conclusion.....	41
------------------------	-----------

Références bibliographiques

Annexes

Résumé

Liste des abréviations

DPPH: 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl

TPC: Total phenolic content

LAB: bactéries lactiques

ANF: Anti-nutritional factors

ACP: Analyse en composantes principales

PREFMAP : Préférence Mapping

R^2 : Correlation coefficient **R_{2adj} :**

Adjusted correlation coefficient

ANOVA: Analysis of variance

Liste des figures

Figure 1: Types de gousses de légumineuses et structure d'une fleur de.	5
Figure 2: Principales variétés de pois chiche	7
Figure 3: Fonctions des probiotiques	18
Figure 4: Graphique de contours triangulaire tridimensionnel illustrant l'effet de la fève (X1), du pois chiche (X2) et de la betterave (X3) sur les réponses.	34
Figure 5: Pouvoir discriminant par descripteur.	36
Figure 6: Coefficients des modèles des échantillons de boissons à base de légumineuses	37
Figure 7: Corrélation entre les variables et les facteurs des boissons	41
Figure 8: Carte de préférence PREFMAP	42

Liste des tableaux

Tableau I: Composition nutritionnelle de différentes légumineuses	6
Tableau II: Les fermentations les plus courantes et les micro-organismes impliqués	16
Tableau III: Types fréquents de bactéries lactiques et leur champ d'application	18
Tableau IV: Conception des mélanges de 9 formulations à base de 3 composés avec contraintes.	22
Tableau V: Réponses observées pour le plan de mélange D-optimal à trois composants	28
Tableau VI: Comparaison des valeurs expérimentales et prédites des réponses sensorielles.....	35
Tableau VII: Moyennes ajustées par produits.	39

Les boissons à base de plantes, également appelées substituts de lait végétaux, sont des dispersions aqueuses obtenues par désintégration, extraction et homogénéisation de matières premières végétales. Ce procédé permet d'obtenir des émulsions colloïdales contenant des particules de 5 à 20 µm, dont l'apparence et la texture rappellent celles du lait bovin **(Nawaz et al., 2022)**. En plus de cette similarité sensorielle, ces boissons présentent un faible indice glycémique et offrent un profil nutritionnel intéressant, caractérisé par la présence de protéines, de minéraux et de composés bioactifs. Certaines formulations, notamment à base de légumineuses, peuvent atteindre une teneur en protéines comparable à celle du lait de vache **(Hamioud et al., 2025)**.

Les légumineuses (la viande du pauvre), les céréales et les oléagineux, en raison de leur riche profil nutritionnel, constituent la cible principale pour la production de différents substituts du lait, améliorant la qualité du lait grâce à des composants bioactifs spécifiques par rapport au lait animal habituel **(Paul et al., 2020)**. Ces alternatives au lait végétal étant une bonne source de protéines, elles ne peuvent pas seulement être utilisées pour répondre aux besoins en protéines alimentaires des consommateurs, mais elles répondent également aux préoccupations liées à l'élevage, qui consomme beaucoup d'énergie et produit des gaz à effet de serre. Les avantages pour la santé des aliments d'origine végétale (céréales, légumineuses, pseudo-céréales, noix et graines) sont de plus en plus reconnus **(Thakur et al., 2024)**.

Les légumineuses constituent une matrice favorable à la fermentation, un procédé naturel permettant d'améliorer les propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des aliments sans recours à des additifs ou conservateurs **(Cichońska & Ziarno, 2021)**. Afin d'assurer la qualité et la reproductibilité des produits fermentés, l'industrie utilise des cultures de départ définies **(Chekdid et al., 2021)**. Ces cultures de démarrage (ou ferments) sont des préparations de micro-organismes vivants, telles que des bactéries, en particulier les bactéries lactiques (*Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*) ou des levures (*Saccharomyces cerevisiae*) utilisées pour stimuler et accélérer la fermentation.

Les bactéries lactiques (LAB) sont les principaux agents de la fermentation des matières végétales, grâce à leur capacité à transformer les sucres en acides organiques, principalement l'acide lactique, entraînant une diminution du pH et une inhibition des microorganismes indésirables **(Thorat et al., 2017)**. Elles contribuent à la stabilité microbiologique des produits fermentés tout en améliorant leurs qualités sensorielles et nutritionnelles **(Ayivi et al., 2020)**. Certaines souches probiotiques, telles que *Lactobacillus plantarum* 299v, produisent également des métabolites bioactifs aux propriétés antimicrobiennes, immunomodulatrices et

conservatrices (**Moradi et al., 2020**). Grâce à leur métabolisme et à leur activité enzymatique, les BL dégradent divers constituants des matrices végétales, générant des composés fonctionnels comme les exopolysaccharides et les peptides bioactifs (**Yang et al., 2024**). Elles sont aujourd'hui largement utilisées pour fermenter divers substrats d'origine végétale, notamment les fruits, légumes, céréales et infusions. Ce processus permet non seulement d'augmenter la durée de conservation des produits, mais aussi de les enrichir en nutriments essentiels comme les fibres, les vitamines C et B, et les composés phénoliques, tout en développant des arômes et textures caractéristiques (**Bautista-Gallego et al., 2020**).

Dans ce contexte, la présente étude vise à optimiser la formulation d'une boisson fermentée à base de légumineuses en utilisant un plan de mélange D-optimal à trois variables (féverole, pois chiche et betterave). L'objectif principal est de développer un produit fonctionnel associant les bénéfices nutritionnels des légumineuses aux effets positifs des bactéries lactiques (LAB). Celles-ci, reconnues pour leur potentiel probiotique, jouent un rôle déterminant dans l'amélioration de la qualité microbiologique, nutritionnelle et sensorielle des matrices végétales fermentées.

L'étude prend également en compte la présence de composés prébiotiques, tels que les fibres alimentaires et les oligosaccharides, naturellement contenus dans les légumineuses, qui favorisent la croissance et l'activité des LAB. En explorant les interactions entre ces micro-organismes et les constituants prébiotiques, cette recherche adopte une approche synergique alliant fermentation, nutrition et optimisation statistique, en vue de formuler une boisson végétale stable, sensoriellement acceptable et à haute valeur fonctionnelle, susceptible de contribuer à la santé intestinale.

I.1. Généralités

Les légumineuses appartiennent à la famille des Fabacées ou Légumineuse et se composent de trois sous familles : Faboideae, Mimosoideae et Caesalpinioideae. C'est une plante déhiscente classée comme la troisième plus grande famille d'angiospermes, composée de plus de 20 000 espèces et 750 genres (**cakir et al, 2019**).

Elles sont riches en protéines, en glucides complexes essentiels, en acides aminés, en graisses insaturées, en fibres alimentaires, en vitamines et en minéraux essentiels, la consommation de légumineuses dans le monde reste néanmoins considérablement faible, inférieure à 3,5 kg par habitant et par an (**Gilham et al, 2018**).

Selon **McCrory et al. (2010)**, les légumineuses sont divisées en quatre grands groupes: les cultures légumières, les cultures fourragères, les légumineuses et les oléagineux. Les cultures légumières sont des légumineuses consommées comme légumes, tandis que les cultures fourragères sont des légumineuses destinées à être semées. Les légumineuses sont des légumineuses récoltées pour leur grain sec, tandis que les oléagineux sont utilisés pour l'extraction d'huile.

L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) a classé les légumineuses en onze classes, dont les haricots secs, les haricots blancs secs, les pois secs, les pois chiches, les doliques secs, les lentilles, le pois bambara, les vesces, les lupins et les légumineuses mineures (**Maphosa et Jideani, 2017**).

I.2. Structure et morphologie

Le fruit de la légumineuse se développe normalement en une gousse qui renferme ses graines. La gousse est un réceptacle unicellulaire constitué de deux parties scellées appelées valves (**Allaire et Brady, 2008**).

Les gousses sont reliées par deux valves et se rompent le long de la jonction. Cette caractéristique est appelée déhiscente, ce qui signifie « bâiller » ou « éclater » en latin. Néanmoins, chaque espèce de légumineuse a la forme d'une gousse. Toutes les gousses de légumineuses n'ont pas une surface lisse ni un caractère déhiscent. Certaines peuvent être ailées ou indéhiscentes. La longueur, l'épaisseur, la

courbure et la nature charnue des gousses peuvent varier selon les espèces, comme le montre la figure 1 (**Allaire et Brady, 2008**).

Généralement, les graines de légumineuses sont composées d'un tégument (testa), de cotylédons et d'embryons. Toutes les graines de légumineuses ont des structures similaires, mais diffèrent par la forme, la couleur, la taille et l'épaisseur du tégument. La couleur du tégument peut être brune, noire, violette, rougeâtre, verte, jaune et marbrée (Amit et al.,2020 ; Vohra et al., 2019).

De plus, la feuille de légumineuse contient un pétiole, ou tige, attaché au noeud, et des appendices appariés, semblables à des feuilles, appelés stipules, soudés à la base du pétiole. La forme des stipules varie, allant de pointes pointues à de longues pointes fines, et leurs marges varient de lisses à irrégulières (Champagne et al., 2007). De plus, la fleur d'une légumineuse comporte normalement cinq pétales et un ovaire avec un carpelle, une cavité et un style.

Les fleurs des légumineuses suivent généralement le modèle du dessin papilionacé comme dans la figure1, qui indique que les fleurs en forme de papillon ou de pois étaient formées d'un grand pétale, à savoir l'étendard, de deux pétales plus étroits appelés ailes et deux autres pétales nommés quille en raison de leur forme (Jennings et Foster, 2020).



Figure 1:Types de gousses de légumineuses et structure d'une fleur de (Allaire et Brady 2008; Jennings et Foster ,2020).

I.3. Composition chimique et valeur nutritionnelle

Les légumineuses sont des aliments riches en protéines, glucides, fibres (**Tableau I**) et Micronutriments tels que la vitamine B, le fer, le cuivre, le magnésium, le manganèse, le zinc et le phosphore. Les légumes secs sont donc une bonne source de protéines dont l'efficacité peut être améliorée par des combinaisons complémentaires d'autres ingrédients avec des profils en acides aminés essentiels différents (**Monnet et al. 2019**).

La qualité nutritionnelle des protéines alimentaires est déterminée en grande partie par leur composition en acides aminés essentiels et leur digestibilité. Les protéines des légumineuses sont généralement riches en lysine, leucine, acide aspartique, acide glutamique et arginine, mais manquent de méthionine, de cystéine et de tryptophane (**Boye et al, 2010**).

Tableau I: Composition nutritionnelle de différentes légumineuses (**Boye et al, 2010**).

Légumineuses	Protéines (%)	Glucides (%)	Fibres (%)	Lipides (%)	Cendres (%)
Pois	34,7	54,72	4,25	2,4	3,93
Pois chiche	19,30	60,65	17,4	6,04	2,48
Lentilles	31,4	56,53	6,75	1,15	4,16
Fèves	26,1	31,7	26,3	1,8	3,08
Haricots	23,8	60,01	24,9	0,83	3,83

I.4. Quelques types de légumineuses

I.4.1. Pois Chiche

I.4.1.1. Définition

Les pois chiches (**Cicer arietinum L.**), sont considérés comme la légumineuse la plus primitive cultivée il y a environ 7 500 ans au Moyen Orient (**Zhao et al, 2021**).

Le pois chiche également appelé pois garbanzo, est considéré comme une bonne source de protéines de haute qualité et possède une bonne valeur nutritive pour l'alimentation humaine. (**Zhao et al., 2021**).

I.4.2. Variétés

- **La variété Desi** : à une forme ridée, un tégument épais et des graines anguleuses à fleurs colorées. Le tégument représente généralement 14 % de la masse totale du grain. Le poids net des graines de la variété Desi varie de 0,1 g à 0,3 g, et couvre 80 à 85 % de la production. Les principaux pays producteurs sont les zones semi-arides, à savoir l'Afrique et l'Asie (**Ipekesen et al, 2022**).
- **La variété Kabuli** : a un tégument fin, des fleurs blanches, une surface lisse, des graines de couleur blanche et un poids des graines compris entre 0,2 g et 0,6 g. Le tégument représente 5 % du poids total des graines. Les variétés Kabuli sont principalement cultivées dans les régions tempérées, à savoir l'Europe, l'Afrique du Nord, l'Amérique du Nord et l'Asie occidentale (**Ipekesen et al, 2022**).

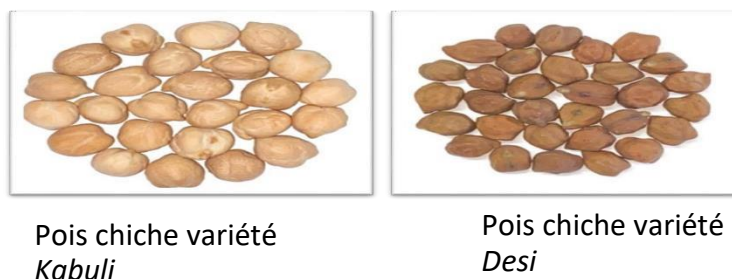


Figure 2: Principales variétés de pois chiche (**Sanjeewa et al., 2010**).

I.4.3 Composition chimique et valeur nutritionnel

Les pois chiches contiennent des protéines de bonne qualité à biodisponibilité élevée (**Kaur et al., 2019**)

Le pois chiche est principalement constitué de glucides, représentant environ 60 à 70% des graines sèches et crues. La teneur en protéines du pois chiche cru et de la farine de pois chiches est d'environ 19,3 % à 22,4 %, ce qui permet de considérer les protéines comme le deuxième composant majeur du

pois chiche. Les protéines principalement retrouvées sont les albumines, les globulines, les prolamines, les gluténines et les protéines résiduelles. Les acides aminés limitants du pois chiche sont les acides aminés soufrés(Iqbal et al., 2006).

Cette légumineuse est également riche en fibres et pauvre en lipides, formant un aliment avec un index glycémique très faible (28 %). C'est également une bonne source de minéraux, tels que le calcium, le phosphore, le magnésium, le fer et le potassium et de composés bioactifs ayant des propriétés intéressantes sur la santé (Manickavasagan et Thirunathan, 2020).

I.5.1. Féverole

I.5.1.1. Définition

La féverole (*Vicia faba* L) est une légumineuse d'hiver appartenant à la famille des Leguminosae. Les pays méditerranéens, l'Égypte, l'Éthiopie, la Chine, l'Inde, l'Afghanistan, l'Afrique du Nord et l'Europe du Nord sont les principaux pays producteurs de féveroles. Les pays les plus consommateurs de légumineuses sont l'Égypte et l'Inde, où elles constituent une source essentielle de nutriments essentiels, notamment de protéines, tandis que dans les pays développés, les protéines animales constituent la principale source de protéines (Gasim, 2015 ; Rochfort et Panozzo, 2007).

I.5.2. Variétés

I.5.2.1 La Séville : est une variété précoce présentant une tige de 0,7m de haut. Elle se distingue des autres variétés par la couleur de son feuillage d'un vert assez franc. Ses gousses présentent une largeur d'environ 3cm et une longueur de 25cm, renfermant 5 à 6 grains volumineux (Laumonier, 1979).

I.5.2.2 L'Aguadulce : est une variété demi-précoce, très répandue en culture. Elle est caractérisée par une végétation haute de 1,10 à 1,20m. Ses gousses sont volumineuses, très longues pouvant atteindre 20 à 25cm, renfermant 7 à 9 graines. C'est une variété très productive (Chaux et Foury, 1994).

I.5.2.3 La Muchaniel : est une variété très précoce, elle a des gousses de couleur vert clair de 20cm de longueur en moyenne, renfermant 5 à 6 grains. Elle est très productive (Chaux et Foury, 1994).

I.5.2.4 Féverole : Selon **Thomas (2008)**, la féverole possède un système racinaire très repoussant et structurant, et de surcroît l'une des plus performantes en matière de fixation de l'azote. La féverole est l'une des espèces les plus utilisées dans les régions montagneuses, particulièrement en Kabylie, pour l'alimentation humaine et animale



I.5.3. Composition chimique et valeur nutritionnelle

La féverole est une culture polyvalente utilisée dans le monde entier pour l'alimentation humaine, animale, fourragère, médicinale, etc. et répond aux besoins alimentaires de base de millions de personnes et d'animaux dans le monde, car elle est une riche source de protéines végétales (environ 30 % riches en lysine), de nutriments, de fibres alimentaires, de métabolites secondaires non nutritifs et de composés bioactifs, tels que des antioxydants, des phénols et de l'acide γ aminobutyrique (GABA) (**Khazaei et al., 2019**), qui exercent un effet antioxydant, réduisant ainsi le stress oxydatif. C'est une excellente source de fibres alimentaires, de choline, de lécithine, de folate et de métabolites secondaires tels que les polyphénols, décrits ci-dessous. La teneur en protéines est d'environ 31 à 34 %, en glucides de 44 à 47 %, en fibres alimentaires de 8 % et en cendres de 3,5 à 4 %. La présence d'isoflavones a prouvé son efficacité dans la prévention de maladies chroniques comme les maladies cardiovasculaires et le diabète. La féverole possède des propriétés antidiabétiques et anti-inflammatoires. Sa

consommation a également été suggérée pour la prise en charge ou la prévention de la maladie de Parkinson. (Coda et al, 2015).

Le rôle de la féverole dans l'industrie alimentaire et animale contribue à améliorer sa qualité nutritionnelle et ses bienfaits pour la santé humaine. De plus, la féverole est une bonne source de minéraux comme le fer et le zinc. Outre sa teneur élevée en protéines et en fibres et son apport énergétique, la féverole a également pour effets positifs de diminuer le taux de cholestérol LDL plasmatique (Ma et al, 2005).

I.6. Différents procédés d'élimination des facteurs antinutritionnels

I.6.1. Procédés thermiques

Les procédés thermiques sont les plus couramment utilisés pour réduire la quantité des facteurs antinutritionnels présents dans les graines. En effet, plusieurs types de facteurs antinutritionnels sont dénaturés par la chaleur et deviennent inactifs tandis que d'autres, thermostables, sont persistants. Les procédés thermiques connus interviennent à plusieurs niveaux :

- **Cuisson** : La cuisson classique permet de réduire la quantité des FAN présents dans les graines comme les oxalates, tanins, phytates, inhibiteurs de trypsine, les composés cyanogénétiques (Edem et al, 1994., Gonzalo et al, 2002).

Une cuisson prolongée à 100°C pourra également les éliminer (Aykroyd et Doughty, 1964). Ces réductions sont dues, soit à une diffusion des facteurs anti nutritionnelle (FAN) dans l'eau de cuisson, soit à une hydrolyse enzymatique due à l'activation des enzymes au début de la cuisson (Lestienne, 2004).

- **L'autoclavage**

C'est un traitement qui consiste à cuire les graines en appliquant de la vapeur sous pression (Andriamitantsoa, 2007). L'autoclavage permet de dégrader la majorité des composés phénoliques. Des réductions de 92 % de teneur en tanins et de 64 % des teneurs en polyphénols totaux ont été enregistrées pour les graines de haricot indien ; pour les graines de dolique, une réduction de 82 % de teneurs en tanins et de 79 % des teneurs en polyphénols totaux (Vijayakumari et al, 1998).

- **Cuisson extrusion**

C'est un traitement qui repose sur l'application de températures élevées (140 à 170°C) pendant de périodes de temps réduites (moins de 90 s) (Andriamitantso, 2007). La cuisson-extrusion peut réduire

les teneurs en composés phénoliques et les phytates. Des réductions de 54 et 84 % des teneurs en tanins et de 29 et 46 % des teneurs en polyphénols totaux, respectivement pour la fève et le haricot ont été notées après cuisson extrusion (**Alonso et al, 2000**). Des taux de réduction de 21 et 4 % des phytates, respectivement de farines de pois et de haricot blanc, ont également été observées avec une température d'extrusion légèrement supérieure à 148°C (**Alonso et al., 2001**).

- **Torréfaction**

C'est un traitement thermique par voie sèche qui consiste en l'application directe et intense de chaleur sèche. Elle entraîne une altération de la structure cellulaire et une libération des minéraux plus ou moins complexés par les phytates ou les composées phénoliques (**Lazaroet al., 2002**). La torréfaction à une température supérieure à 140°C permet d'inactiver les FAN.

I.6.2. Trempage

Comme son nom l'indique, le trempage est une technique traditionnelle qui consiste à tremper les graines. La température et la durée de trempage constituent des paramètres déterminants pour leur efficacité. Le trempage est souvent utilisé comme prétraitement des graines. Son utilisation permet d'enlever les téguments plus ou moins rigides des graines. Il peut entraîner un début de réduction des teneurs en FAN et notamment en phytates (**Fredlund et al, 1997**). Au cours du trempage, des transferts des matières peuvent avoir lieu entre le compartiment alimentaire et le milieu de trempage, une partie des inhibiteurs peut être éliminée au moment de la diffusion (**Hötz et Gibson, 2001**).

I.6.3. Germination

La germination peut favoriser le développement d'arômes et de saveurs souhaitables, améliorant ainsi les qualités organoleptiques (**Roland, Pouvreau, Curran, van de Veldeet de Kok, 2017**).

Setia et al. (2019) ont rapporté que la germination pendant de courtes durées (24 à 72 h) était utilisée comme une méthode efficace pour préparer des farines de légumineuse avec des propriétés fonctionnelles diversifiées qui amélioreraient la valeur nutritionnelle.

I.6.4. Fermentation

La fermentation est un processus anaérobie au cours duquel des enzymes endogènes ou exogènes peuvent être activés permettant ainsi la dégradation de certains facteurs antinutritionnels (**Chavan et Kadam, 1989**).

I.7. Bienfaits des légumineuses pour la santé

Dotées d'un faible indice glycémique, à faible teneur en lipides et à haute teneur en fibres, les légumineuses conviennent aux diabétiques. Leurs teneurs élevées en fibres augmentent la satiété et aident

à stabiliser la glycémie et le taux d'insuline, ce qui réduit les pointes après les repas et améliore la résistance à l'insuline **(FAO, 2016)**.

Les légumineuses peuvent contribuer à réduire les risques de maladies coronariennes. Elles sont riches en fibres solubles, connues pour leurs effets positifs sur le taux du LDL-cholestérol, un facteur de risque reconnu de la maladie coronarienne **(FAO, 2016)**.

Les légumineuses sont une bonne source de vitamines, telle que l'acide folique (vitamine B9), qui aide à réduire le risque d'anomalies du tube neural (ATN), comme le spina-bifida chez les nouveau-nés **(FAO, 2016)**.

Leur haute teneur en fer fait des légumineuses un aliment excellent pour prévenir l'anémie ferriprive chez les femmes et les enfants, notamment si elles sont accompagnées d'aliments riches en vitamine C qui améliore l'absorption du fer **(FAO, 2016)**.

Elles sont sans gluten, ce qui en fait un aliment bénéfique pour les personnes allergiques au gluten ou souffrant de la maladie cœliaque. Les légumineuses sont riches en composés bioactifs tels que les composés phytochimiques et les antioxydants **(FAO, 2016)**.

Les réactions allergiques d'origine alimentaire notamment laitières constituent un problème de santé croissant, notamment les protéines du lait de vache qui sont un allergène majeur. La malabsorption et l'intolérance au lactose peuvent également être la cause de la mauvaise. Toutes ces situations nécessitent donc l'exclusion du lait de ruminants de l'alimentation totale ou partielle (**Escobar-Sáez et al., 2022**).

Les alternatives sont souvent des boissons végétales, dont l'apparence et les utilisations sont similaires à celles du lait. Ces boissons végétales ne peuvent pas être qualifiées de lait, car ce terme est réservé au produit des glandes mammaires. Depuis le 14 juin 2017, la Commission de l'Union Européenne a interdit l'appellation « lait végétal » pour les produits provenant des végétaux à l'exception du lait d'amande et du lait de coco. Le lait végétal est recommandé pour les personnes allergiques au lait (sans lactose, sans caséines) (**European Union, 2010, Gobbi et al, 2019**).

Ces boissons végétales/non laitières sont de plus en plus demandées dans le monde en raison des problèmes caloriques et de l'hypercholestérolémie, en plus des allergies. Cette demande peut être attribuée à leur composition nutritionnelle unique offrant une gamme diversifiée de composants bioactifs, tels que les composés phénoliques et les flavonoïdes, connus pour leurs propriétés antioxydantes (**Kurbanova et al., 2024**).

Les légumineuses sont une source précieuse de protéines et de lipides, mais leur valeur nutritionnelle peut être limitée par l'indigestion de leurs tissus et la présence de facteurs antinutritionnels tels que les inhibiteurs de trypsine et les glucides mal digérés. Ces facteurs peuvent entraver l'absorption et la digestion, et potentiellement entraîner des troubles digestifs comme la diarrhée (**Patil et al. • 2024**).

Ayivi et al. (2022) affirment que la fermentation peut améliorer le goût et les propriétés nutritionnelles, contribuant à une consistance plus épaisse et une texture plus onctueuse grâce à la production de polysaccharides et d'autres métabolites pendant la fermentation. De plus, l'incorporation de probiotiques introduit des bactéries bénéfiques vivantes, renforçant les propriétés bénéfiques pour la santé des produits fermentés en plus de l'amélioration de la texture et la consistance des boissons fermentées.

II.1 Fermentations alimentaires

II.1.1.Définition

La fermentation des aliments végétaux est le « processus de décomposition lente de substances organiques induit par des micro-organismes (bactéries, levures, moisissures) transforment des sucres présents dans les

végétaux en d'autres composés, notamment des acides organiques, qui contribuent à la Conservation et à la transformation du goût des aliments **(Walker, 1988)**. Ce terme englobe différents types de fermentation, tels que la fermentation par les levures, la fermentation lactique, la fermentation butyrique, la fermentation propionique et la fermentation acétique. La diversité du phénomène conduit à une variété de produits finaux, parmi lesquels le CO₂, l'éthanol, les acides organiques et d'autres molécules organiques. Ce sont ces nombreux produits qui rendent la fermentation si utile et intéressante, **(Voidarou et al.,2020)**,

II.1.2.Historique

Les fermentations de substrats végétaux existent depuis la nuit des temps notamment comme moyen de conserver les aliments, améliorer leurs qualités nutritionnelles ou en sublimer le goût. C'est ainsi que dans l'antiquité, étaient, réalisées des bouillies ou des boissons fermentées. On trouve des descriptifs de fabrication de bière en Egypte antique **(Voidarou et al.,2020)**,

Des informations indiquent que des boissons fermentées étaient produites il y a plus de 7 000 ans à Babylone (aujourd'hui l'Irak), il y a 5 000 ans en Égypte, il y a 4 000 ans au Mexique et il y a 3500 ans au Soudan. La Chine serait le berceau des légumes fermentés et de l'utilisation des moisissures *Aspergillus* et *Rhizopus* pour la fabrication des aliments. Le livre « Shu-Ching », écrit sous la dynastie Chou en Chine (1121-256 av. J.-C.), fait référence à l'utilisation du « chu », un produit céréalier fermenté **(Battcock et Azam-Ali, 1998)**

II. 2.Intégration des légumineuses dans les boissons fermentées et leurs avantages

Parmi les ingrédients utilisés pour la fabrication de ces boissons, les légumineuses occupent une place particulière. Elles sont reconnues comme une excellente source de composés bioactifs, tels que les polyphénols, les stérols végétaux ou encore certains glucides indigestes, qui apportent divers bienfaits physiologiques et métaboliques **(Moreno-Valdespino, Luna-Vital, Camacho-Ruiz et Mojica, 2020)**.Généralement consommées après transformation, les légumineuses offrent alors une meilleure biodisponibilité de leurs nutriments , et des molécules bioactives, et améliore également l'appétence des aliments **(Zaheer et HumayounAkhtar; 2017Wang et al., 2018)**.

Le profil nutritionnel des légumineuses, caractérisé par une teneur élevée en protéines des glucides à faible indice glycémique et une richesse en minéraux, les positionne comme des matières premières prometteuses, capables de relever les défis actuels de la production alimentaire et de répondre aux attentes des consommateurs. Largement disponibles sur le marché, les protéines offrent diverses propriétés fonctionnelles souhaitées telles que l'absorption des graisses, la liaison de l'eau, les propriétés gélifiantes et

Émulsifiantes (**Grac Raymundo et de Sousa 2016**). En fonction de la légumineuse incorporée, le score en acides aminés essentiels est amélioré, notamment celui de la lysine (**Polak et al, 2015 ; Laleg et al. 2016**).

II.3. Impact de la fermentation sur la composition nutritionnelle et les propriétés sensorielles des boissons végétales

Les boissons fermentées à base de légumineuses ont une composition nutritionnelle intéressante, riche en composés bioactifs comme les peptides, les polyphénols, les flavonoïdes, et les isoflavones. La fermentation, réalisée par des bactéries lactiques telles que *Lactobacillus* et *Bifidobacterium*, modifie la composition des légumineuses, améliorant leur valeur nutritionnelle, ainsi que l'élimination des facteurs antinutritionnels, ce qui favorise une meilleure biodisponibilité des nutriments. Dans le cas des protéines, ce processus peut améliorer leur digestibilité, car elles sont partiellement hydrolysées en polypeptides, oligopeptides et acides aminés libres. Le profil d'acides aminés obtenu peut varier en fonction de la composition protéique initiale de la matrice végétale spécifique fermentée et du microbien (**Hidalgo-Fuentes et al., 2024**).

La fermentation peut également améliorer la biodisponibilité des minéraux en diminuant la présence de facteurs antinutritionnels tels que l'acide phytique, les saponines, les tanins condensés et les inhibiteurs de trypsine, entre autres, qui peuvent se lier aux minéraux et entraver leur absorption. Les phytases et les tannases microbiennes, dérivées des bactéries lactiques ou des levures, peuvent dégrader respectivement les phytates et les tanins. De même, il a été rapporté que certaines bactéries lactiques peuvent métaboliser les oxalates, réduisant ainsi leur concentration dans le produit final fermenté (**Hidalgo-Fuentes et al., 2024**).

Dans la cuisine turque, la tarhana, une soupe fermentée à base de céréales, de légumes et de yaourt, subit une fermentation lactique, ce qui lui confère son goût acide caractéristique. Des bactéries telles que *L. plantarum*, *S. thermophilus* et *Weissella cibaria* jouent un rôle déterminant dans ses propriétés sensorielles. De même, dans la boisson boza du Moyen-Orient, préparée à partir de céréales comme le millet ou le blé, la fermentation transforme l'amidon en sucres et en acide lactique, lui conférant une saveur aigre-douce. *L. paracasei*, *L. plantarum* et *L. lactis* sont fréquemment retrouvées dans la boza, contribuant à son goût et à sa texture distinctifs. Dans la cuisine asiatique, le tofu malodorant est fermenté dans une solution de saumure, où les bactéries lactiques, ainsi que des espèces du genre *Bacillus*, dominent la communauté microbienne, conférant au tofu son odeur et sa saveur caractéristiques (**Anumuka et al. 2024**).

II.4. Principaux microorganismes utilisés dans la fermentation des aliments

Les micro-organismes appartenant à des groupes très variés sont utilisés pour la fermentation des aliments. Au nombre de ces ferments, les bactéries lactiques sont très présentes. Dans les fermentations traditionnelles, la flore microbienne indigène des matières premières ou de l'environnement généralement complexe est responsable des procédés de fermentation. Cependant, dans les productions industrielles, des souches spécifiques sont utilisées dans des conditions précises, permettant d'obtenir des produits ayant des caractéristiques désirées, uniformes et continues (Sahlim, 1999).

Les groupes de micro-organismes les plus fréquemment impliqués dans les fermentations alimentaires sont les bactéries, les levures et les moisissures (Tableau II).

Tableau II: Les fermentations les plus courantes et les micro-organismes impliqués (Voidarou et al., 2020)

Type de fermentation	Microorganismes impliqués	Alimentation/Environnement	Principaux produits finis
Fermentation alcoolique	levures	Vin, bière, levain	$2 \text{ glucose} \rightarrow 2 \text{ glycérol} + \text{acide acétique} + \text{éthanol}$
Acide lactique (homofermentation)	Bactéries lactiques (<i>Lactobacillus</i> spp. etc.)	Produits laitiers, viandes fermentées et légumes fermentés, etc.	$\text{Glucose} \rightarrow 2 \text{ acide lactique} + 1 \text{ ATP}$ (Embden-Meyerhof-Parnas)
Acide lactique (hétérofermentation)	Bactéries lactiques (<i>Lactobacillus</i> spp. etc.)		Sucres à 5 et 6 carbones $\rightarrow$ acide lactique + acide acétique + éthanol + 1 ATP
acide butyrique	<i>Clostridium</i> spp., <i>Butyrivibrio</i> spp., <i>Bacillus</i> spp. et autres anaérobies	Sédiments des marais, réseaux d'égouts	$4 \text{ glucose} \rightarrow 2 \text{ acétate} + 3 \text{ butyrate} \rightarrow \text{acide butyrique, butanol, acétoïne, isopropanol, acétate, éthanol, 2,3-butadiénol}$
Acide mixte	Entérobactéries (<i>Escherichia</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Salmonella</i> spp., <i>Klebsiella</i> spp., <i>Shigella</i> spp. etc.)	Tube digestif humain et animal, eau douce	$\text{Glucose} \rightarrow \text{acide acétique, acide formique, acide lactique, acide succinique, éthanol}$
acide propionique	<i>Propionibacterium</i> spp., <i>Veillonella</i> spp., <i>Bacteroides</i> spp., certaines <i>Clostridia</i> spp.	produits laitiers	$\text{Glucose, glycérol, lactate} \rightarrow \text{propionate, acétate,}$
acide acétique	<i>Acetobacter</i> spp., <i>Gluconobacter</i> spp., <i>Bacillus subtilis</i>	Industrie de l'acide acétique	Oxydation des sucres, des alcools de sucre, de l'éthanol $\rightarrow$ acide acétique

II.4.1 Bactéries

Les bactéries les plus importantes pour les fermentations alimentaires souhaitables sont les lactobacilles, capables de produire de l'acide lactique à partir de glucides. On retrouve, le bien nommé, *Lactobacillus plantarum* et des souches hétérofermentaires (productrices de gaz) telles que *Lactobacillus Brevis*. On a identifié d'autres bactéries lactiques tels que des *Leuconostocs* et de *Pédiocoques*. D'autres bactéries importantes, notamment dans la fermentation des fruits et légumes, sont les espèces d'*acétobacter* productrices d'acide acétique (**Battcock et Azam-Ali, 1998**).

Grâce à leurs caractéristiques physiologiques et métaboliques uniques, les bactéries lactiques peuvent utiliser divers substrats et à produire une large gamme de métabolites, tels que des acides organiques, des bactériocines et d'autres composés antimicrobiens, les rend essentiels pour améliorer la sécurité alimentaire, la saveur et la conservation (**Battcock et Azam-Ali, 1998**).

Leurs processus métaboliques, en particulier la fermentation lactique, inhibent non seulement la détérioration et les micro-organismes pathogènes, mais améliorent également les qualités sensorielles des aliments fermentés, telles que la texture, le goût et l'arôme. Les types courants de bactéries lactiques et leur champ d'application dans la transformation des aliments sont présentés dans le tableau III (**Voidarou et al., 2020**).

Tableau III: Types fréquents de bactéries lactiques et leur champ d'application

Type de LAB	Champ d'application
<i>Lactobacillus</i>	Fermentation laitière (yaourt, fromage, kéfir), supplémentation en probiotiques et fermentation de légumes.
<i>Lactococcus</i>	Développement de la saveur et de la texture des aliments fermentés, fermentation des produits laitiers et constituants bioconservateurs.
<i>Leuconostoc</i>	Amélioration de la saveur et de l'arôme des légumes fermentés
<i>Pediococcus</i>	Fermentation de la bière et du vin, amélioration du goût des boissons fermentées et inhibition des micro-organismes pathogènes dans les produits alimentaires fermentés.
<i>Streptococcus</i>	Production de yaourt et de fromage
<i>Oenococcus</i>	Fermentation malolactique du vin, amélioration de la saveur et de la stabilité
<i>Weissella</i>	Fermentation de légumes, de poissons et d'autres aliments traditionnels
<i>Enterococcus</i>	Amélioration de l'arôme, de la texture et de la saveur des produits laitiers fermentés

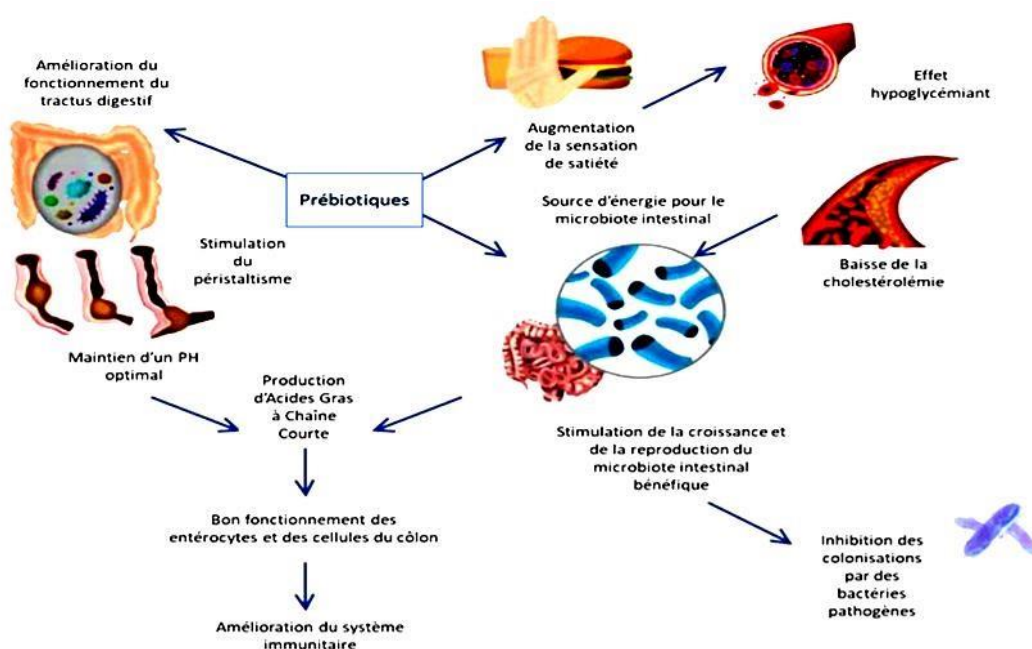


Figure 3: Fonctions des probiotiques

Les probiotiques (**Figure 3**) ont de multiples effets sur la muqueuse intestinale : augmentation de la production de mucus, amélioration de l'intégrité de la barrière intestinale, modulation du système immunitaire par la production de cytokines (**Cuamatzin-García et al. 2022**).

II.4.2 Levures

Les levures jouent un rôle important dans l'industrie agroalimentaire car elles produisent des enzymes qui favorisent des réactions chimiques bénéfiques, comme la levée du pain et la production d'alcool et de sucre inverti. Les plus bénéfiques pour la fermentation alimentaire sont celles de la famille des *Saccharomyces*, et plus particulièrement de *S. cerevisiae* (**Battcock et Azam-Ali, 1998**).

II.4.3 Moisissures

Les moisissures sont à la fois des agents de détérioration et de conservation des aliments. Certaines confèrent des saveurs caractéristiques aux aliments et produisent des enzymes, comme l'amylase pour la panification. Les moisissures du genre *Penicillium* sont associées à l'affinage et à la saveur des fromages. Ces moisissures sont fréquentes dans les aliments et peuvent tolérer de fortes concentrations de sel et de sucre (**Battcock et Azam-Ali, 1998**).

II.5. Bienfaits de la fermentation des fruits et légumes

Les boissons végétales fermentées sont des boissons aux propriétés bénéfiques pour la santé. Ils contribuent à l'apport en fibres, de vitamines et des minéraux D'autres bénéfices plus spécifiques pourront être obtenus en fonction des souches de bactéries (ou de levures) présentes et donc des produits. Les recherches ont montré que les aliments et boissons fermentés traditionnels pourraient être utilisés dans le cadre de traitements multimodaux de nombreuses pathologies cardiovasculaires, du diabète de type 2 ou encore de problèmes neurologiques. Ce champ de recherche reste néanmoins à explorer afin de déterminer les dosages adéquats, durées de traitement ainsi que les effets à court et à long terme (**Benkiran, M. 2023**).

De nombreuses études mettent en évidence de potentiels effets bénéfiques sur la santé de la consommation d'aliments et de boissons fermentés, elles soulignent les impacts (**Cuamatzin-García et al. 2022**) favorables sur :

- la régulation de la réponse et de la fonction immunitaires ;
- la fonction métabolique ;

- le risque cardiovasculaire ;
- le contrôle du poids corporel et de la masse grasse ;
- la pression artérielle ;
- la santé du cerveau ;
- amélioration de la sécurité alimentaire.

Ces effets bénéfiques sur la santé des consommateurs s'expliquent en particulier par la présence des probiotiques et des prébiotiques présents dans les aliments fermentés **(Cuamatzin-García et al. 2022)**

III.1. Matériel végétal

Deux graines de légumineuses distinctes ont été utilisées dans cette étude : la fève (Vicia faba L.) et le pois chiche (Cicer arietinum L.). Les graines ont été obtenues auprès d'un agriculteur local situé à Beni Maouche (Bejaïa, Algérie). La betterave utilisée a été achetée dans un marché local à Bejaïa (Algérie).

III.2. Développement des boissons

III.2.1. Souche bactérienne et préparation de l'inoculum pour la fermentation

La culture probiotique a été préparée en utilisant la souche *Lactobacillus plantarum* B218 qui a été systématiquement transférée (2 % v/v de l'inoculum) dans du bouillon MRS frais et incubée en anaérobiose à 37 °C pendant 18 h. La culture starter utilisée comme inoculum dans le processus de fermentation a été préparée selon la méthode décrite par Skrzypczak et al., (2024). Brièvement, la biomasse cellulaire bactérienne a été récoltée par centrifugation (8000× g, 10 min, 4 °C ; Centrifugeuse réfrigérée Digicen 21R – Orto Alresa, Madrid, Spain) après 18 heures d'incubation. Le culot obtenu a été lavé deux fois avec une solution stérile de NaCl (0,9 %) et remis en suspension (également dans une solution saline) pour obtenir une suspension de densité optique (mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre Shimadzu UV 1800, Allemagne) équivalente à $OD_{550} = 0,5$ (correspondant à 6×10^8 CFU/mL). Cette suspension a été utilisée pour l'inoculation.

III.2.2. Préparation des boissons

Des graines de fève (Vicia faba L.), de pois chiche (Cicer arietinum L.) ainsi que de la betterave (Beta vulgaris L.) ont servi de matière première pour la production de boissons fermentées à base de plantes. Chaque formulation de boisson végétale a été préparée de manière similaire, en suivant la méthode décrite par Skrzypczak et al. (2024) avec quelques ajustements. Dans un premier temps, les graines ont été soigneusement lavées, puis trempées dans de l'eau à température ambiante (22 °C), selon un rapport graines/eau de 1:2 (m/v), pendant 16 heures. Après égouttage, les graines ont été placées dans un mixeur avec de la betterave fraîche, 100 mL d'eau distillée, et 4 g de sucre ont été ajoutés. Le mélange a été broyé à l'aide d'un robot de cuisine jusqu'à obtention d'une suspension homogène. Celle-ci a ensuite été filtrée et pressée à l'aide d'un tissu filtrant afin d'extraire la phase liquide, constituant les boissons végétales. Les liquides filtrés ont été transférés dans des bouteilles stériles, fermés hermétiquement et pasteurisés au bain-marie à 85°C pendant 10 minutes.

Après refroidissement à environ 37°C, les variantes préparées de produits à base de plantes ont été inoculées dans des conditions stériles avec 2 % (v/v) de l'inoculum frais préparé précédemment. Le processus de fermentation s'est déroulé à 37 °C pendant 48 heures. Les valeurs de pH et de Brix des boissons ont été mesurées après la pasteurisation (avant l'inoculation) et après 24 et 48 heures de fermentation.

Toutes les procédures susmentionnées ont été exécutées dans des conditions stériles.

III.3. Optimisation de la formulation des boissons

III.3.1. Plan de mélange D-optimal

La conception du plan de mélange D-optimal a été réalisée avec le logiciel JMP version 16, pour optimiser les trois constituants de la formulation d'une boisson végétale fermentée à base de légumineuses. Neuf mélanges ont été obtenus par le plan à 3 facteurs (Tableau IV) avec des contraintes de ratio inférieur (40% pour la féverole, 10% pour le pois chiche, 4% pour la Betterave) et des contraintes de ratio supérieur (80% pour la féverole, 40% pour le pois chiche, 20% pour la Betterave). Le modèle mathématique cubique centré réduit nous permet de prédire les valeurs des réponses expérimentales à partir des courbes d'isoreponses, pour le pH, l'acidité titrable, la teneur en TPC, DPPH, la viscosité, le taux des protéines et le dénombrement des probiotiques. L'équation (1) montre le modèle cubique qui a été ajusté à chaque réponse, où B_i représente les coefficients et X_i représente les valeurs des facteurs.

$$Y=(B_1*X_1)+(B_2*X_2)+(B_3*X_3)+(B_{12}*X_1*X_2)+(B_{13}*X_1*X_3)+(B_{23}*X_2*X_3)+(B_{123}*X_1*X_2*X_3)(1)$$

Tableau IV: Conception des mélanges de 9 formulations à base de 3 composés avec contraintes.

N°exp.	Nom	Fèverole	Pois chiche	Betterave
1	E1	0,56	0,40	0,04
2	E2	0,70	0,10	0,20
3	E3	0,40	0,40	0,20
4	E4	0,48	0,36	0,16
5	E5	0,51	0,40	0,09
6	E6	0,80	0,16	0,04
7	E7	0,62	0,25	0,12

8	E8	0,52	0,28	0,20
9	E9	0,80	0,10	0,10

III.4. Caractéristiques physicochimiques

III.4.1. Mesure du pH

Le pH a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre (HI-2002 Edge, Hanna Instruments, USA). L'électrode a été immergée directement dans la boisson afin d'enregistrer les valeurs de pH.

III.4.2. Acidité titrable

L'acidité en termes d'acide lactique a été déterminée à l'aide de la méthode titrimétrique (Caric et al., 2000). Dix millilitres de boisson végétale fermentée ont été titrés sous agitation avec une solution de NaOH 0,1 N, en présence de phénolphthaléine (1 % en éthanol) comme indicateur, jusqu'à atteindre le point d'équivalence conventionnel (pH 8,2), suivi à l'aide d'un pH-mètre calibré. Chaque échantillon a été analysé en triplicat.

L'acidité titrable a été exprimée en g d'acide lactique/L (gAL/L) selon la formule :

$$\text{Acidité titrable (g/L)} = \frac{C \times V_{\text{NaOH}} \times 90,08}{V}$$

- C : concentration de NaOH (mol/L)
- V_{NaOH} : volume de NaOH utilisé (en L)
- V : volume de boisson titré (en L)

III.4.3. Mesures rhéologiques

La viscosité apparente des boissons à base de légumineuses a été mesurée à l'aide d'un rhéomètre à contrainte contrôlée (Anton Par MRC 702, Austria), équipé d'un système de mesure à cylindre concentrique à double espace (double gap), modèle DG27/T200/SS. Les mesures ont été réalisées à une température de 20 ± 1 °C, afin de minimiser toute séparation de phase. Des essais en régime stationnaire ont été effectués pour des taux de cisaillement compris entre $1,0 \times 10^{-5}$ et $1,0 \times 10^3$ s⁻¹. Chaque essai a duré 11 minutes et a été réalisé en triplicata sur des échantillons soigneusement homogénéisés. Les courbes d'écoulement ont été ajustées au modèle de Carreau, étant donné que les boissons à base de légumineuses présentent un

comportement non newtonien, caractérisé par un effet d'amincissement sous cisaillement (shear-thinning), c'est-à-dire une diminution de la viscosité avec l'augmentation du taux de cisaillement (Lopes et al., 2020):

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{(1 + (K\dot{\gamma})^2)^{\frac{m}{2}}}$$

Où :

- η_0 est la viscosité newtonienne à faible cisaillement (Pa·s) ;
- η_{∞} est la viscosité newtonienne à fort cisaillement (Pa·s) ;
- $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement (s^{-1}) ;
- K est le temps de relaxation (s), et son inverse $1/K$ correspond au taux de cisaillement critique (début de l'amincissement) ;
- m est une constante sans dimension liée à la loi de puissance, reflétant l'écart par rapport au comportement newtonien.

III.4.4. Dosage des protéines

La teneur en protéines solubles a été déterminée selon la méthode de Bradford (1976). Brièvement, 0,1 mL d'échantillon de boisson végétale fermentée ont été prélevés et mélangés à 1 mL de réactif de Bradford. Les tubes ont été agités par inversion, puis incubés à l'abri de la lumière à température ambiante pendant 5 minutes. L'absorbance a été mesurée à 595 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (UV-1800, Shimadzu). Une courbe d'étalonnage a été établie à partir de solutions standards d'albumine de sérum bovin (BSA) et les concentrations protéiques ont été exprimées en mg d'équivalent albumine de sérum bovin par mL (mg EBSA/mL). Toutes les mesures ont été réalisées en triplicat.

III.5. Caractéristiques phytochimiques

III.5.1. Extraction des composés phénoliques

L'extraction des composés phénoliques des boissons a été réalisée selon la méthode décrite par Moretto et al. (2021). Un volume de 1,5 mL de l'échantillon a été extrait à l'aide de 30 mL d'éthanol à 80 % (v/v). Le mélange a été agité pendant 1 heure, puis centrifugé à 5000 tr/min pendant 20 minutes. Le surnageant a ensuite été filtré à l'aide d'un papier filtre Whatman n°4. Le filtrat obtenu a été utilisé pour le dosage des composés phénoliques totaux ainsi que pour l'évaluation de l'activité antioxydante.

III.5.2. Dosage des polyphénols totaux

La teneur en composés phénoliques totaux (TPC) des extraits a été déterminée selon la méthode de Singleton & Rossi (1965). Un volume de 200 μL d'extrait dilué a été mélangé avec 1 mL de réactif de FolinCiocalteu à 10 %. Après un temps de repos de 1 à 8 minutes, 800 μL d'une solution de Na_2CO_3 à 7,5 % (p/v) ont été ajoutés. Le mélange a ensuite été incubé pendant 2 heures à température ambiante et dans l'obscurité.

L'absorbance a été mesurée à 765 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV.

L'acide gallique a été utilisé comme standard, et les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalents d'acide gallique (mg EAG) par cent millilitre de boisson.

III.5.3. Essai de piégeage du DPPH

Le dosage de l'activité antioxydante par le radical DPPH• (radical 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyl) a été réalisé selon la méthode décrite par Dudonné et al. (2009). Une solution de DPPH• ($60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) a été préparée, et 3 mL de cette solution ont été mélangés avec 100 μL d'extrait d'échantillon. Les mélanges ont été incubés pendant 20 minutes à 37 °C, dans un bain-marie, à l'abri de la lumière. L'absorbance a été mesurée à 515 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible.

Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH• a été calculé selon l'équation suivante :

$$\% \text{ d'inhibition} = \frac{A_c - A_e}{A_c} \times 100$$

Où :

A_c = absorbance du contrôle (solution de DPPH• seule à $t = 0$),

A_e = absorbance du mélange DPPH• + extrait après 20 minutes.

Une courbe d'étalonnage a été établie à partir de solutions standards de Trolox, et les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalents Trolox par millilitre de boisson végétale (mg ET/100mL).

III.6. Dénombrement des bactéries lactiques

Le dénombrement des bactéries lactiques a été effectué selon la méthode décrite par Durukan et al. (2024). Après fermentation, chaque échantillon a été dilué dans une solution stérile de NaCl à 0,9 % (m/v) pour obtenir une suspension initiale, puis soumis à deux dilutions décimales successives (10^{-4} et 10^{-5}). Pour

chaque dilution, 0,1 mL ont été étalés en double sur des boîtes de pétri contenant de la gélose MRS. Les boîtes ont été incubées à 37 °C pendant 48 h en conditions anaérobies.

Les colonies caractéristiques ont ensuite été comptées, et le nombre d'unités formant colonie (UFC) a été calculé selon la formule :

$$N = \frac{\sum C}{V \times d \times n}$$

où

:

- $\sum C$: somme des colonies comptées
- V: volumeensemencé (mL)
- d: facteur de dilution correspondant
- n : nombre de boîtes comptées

Les dénombrements ont été réalisés en triplicat et les résultats exprimés en $\log_{10}$ UFC/mL.

III.7. Analyse sensorielle

Une analyse sensorielle a été réalisée au laboratoire d'analyse sensorielle de la Faculté des Sciences Alimentaires de l'Université de Bejaia, avec un panel de 11 experts âgés de 25 à 50 ans. Les tests ont porté sur neuf échantillons de boissons végétales fermentées, élaborés selon le plan expérimental présenté dans le tableau II et codés de A à I. Après fermentation, les échantillons ont été conservés à 4 °C pendant au moins deux heures avant l'évaluation.

Chaque dégustateur a reçu un questionnaire (annexe 2) destiné à évaluer diverses caractéristiques organoleptiques : couleur, homogénéité, odeur, goût, saveur sucrée, saveur acide, arrière-goût, texture en bouche et consistance. Ces attributs sensoriels ont été notés à l'aide d'une échelle hédonique à cinq points, allant de 1 (extrêmement détesté) à 5 (extrêmement apprécié). Une note d'acceptabilité globale a également été attribuée selon une échelle hédonique à neuf points, où 1 correspond à un dégoût extrême et 9 à un plaisir extrême.

III.8. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel JMP 16, un progiciel destiné à la conception et à l'analyse d'expériences et de plans d'expériences. Toutes les expériences ont été réalisées au moins trois fois, ce qui a permis de déterminer les valeurs moyennes et les écarts-types. Des tests ANOVA ont été effectués pour comparer les moyennes ainsi que les coefficients de corrélation entre les autres paramètres.

Les variances ont été considérées comme significatives à un seuil de 95 % ($p < 0,05$).

IV.1. Optimisation des conditions de formulation optimales de la boisson protéique

IV.1.1. Modélisation et ajustement du modèle

Le plan expérimental de mélange et les réponses ultérieures associées sont résumés dans le tableau V.

Tableau V:Réponses observées pour le plan de mélange D-optimal à trois composants

Mix	Y ₁ - pH	Y ₂ -Acidité Titrable	Y ₃ -TPC	Y ₄ - DPPH	Y ₅ - Total LAB	Y ₆ - Viscosité	Y ₇ - Protéine
01	4,1	1,35	36,41	15,97	6,65	5	2,03
02	4,04	1,35	35,78	19,09	6,48	2,65	3,11
03	4,39	1,35	51,72	27,58	7,97	3,51	2,51
04	4,3	1,37	56,79	14,1	7,05	4,09	1,3
05	4,19	1,38	61,05	8,63	6,67	4,5	1,4
06	4,5	1,37	52,42	7,7	6,79	4,66	1,47
07	4,46	1,36	49,52	7,34	6,74	4,17	1,3
08	4,25	1,36	48,13	10,07	6,22	3,57	1,51
09	4,47	1,4	73,9	9,16	7,1	3,21	1,3

La technique des moindres carrés a été utilisée pour calculer les coefficients de régression des termes d'interception, linéaires, quadratiques et d'interaction (tableau v).

➤ Effet sur le pH

Les résultats obtenus indiquent que la féverole (X₁) et le pois chiche (X₂) ont un effet linéaire significatif ($p < 0,05$) sur le pH de la boisson fermentée préparée. En plus d'un effet interactif significatif entre les pois chiches et la betterave X₂*X₃ ($p < 0,0413$). Ces effets peuvent se traduire par une amélioration de l'acidité, de la fermentation, ou de l'activité probiotique. Le pH dépend non seulement de la capacité d'acidification des bactéries lactiques (via l'acide organique) mais aussi des transformations biochimiques complexes et par l'activité des systèmes protéolytiques bactériens, qui libèrent des composés alcalinisant à partir de bactéries natives protéines, modulant ainsi le niveau de pH (Skrzypczak et al. 2024)

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
(FV-0,4)/0,46	4,4122872	0,098323	44,88	0,0005*
(PP-0,1)/0,46	3,0295147	0,307378	9,86	0,0101*
(Bettrave-0,04)/0,46	-0,445073	1,061183	-0,42	0,7157
FV*PP*Bettrave	-7,899727	3,7344	-2,12	0,1687
FV*PP	2,5428556	1,019058	2,50	0,1300
FV*Bettrave	5,8791995	1,8339	3,21	0,0851
PP*Bettrave	11,275451	2,364725	4,77	0,0413*

➤ Effet sur l'acidité

Les résultats obtenus indiquent un effet significatif linéaire des trois facteurs X1(Fèverole) X2 (Poids chiche) et X3 (betterave) ($p < 0,05$) sur l'acidité de notre boisson préparée. En plus des effets interactifs significatifs entre la féverole et le pois chiche $X_1 * X_2$ ($p < 0.0125$) et entre la féverole et le pois chiche et la betterave $X_1 * X_2 * X_3$ ont été observés ($p < 0,0157$).

Leur combinaison optimise les caractéristiques fonctionnelles du produit final. Ces observations confirment l'importance d'une formulation équilibrée et du choix judicieux des ingrédients dans le développement de boissons fermentées à base de légumineuses, et soulignent le rôle bénéfique de la betterave dans certaines combinaisons.

Par ailleurs, ces résultats sont en accord avec les travaux de **Kwon et al. (2000)**, qui ont montré que l'augmentation de la supplémentation en source d'azote entraînait une production accrue d'acide lactique, et donc une augmentation de l'acidité des boissons probiotiques.

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%
(FV-0,4)/0,46	1,4298274	0,006747	211,92	<,0001*	1,400798	1,4588569
(PP-0,1)/0,46	1,5211897	0,021092	72,12	0,0002*	1,4304375	1,611942
(Bettrave-0,04)/0,46	1,2534527	0,072818	17,21	0,0034*	0,9401421	1,5667632
FV*PP*Bettrave	2,0194335	0,256253	7,88	0,0157*	0,9168647	3,1220022
FV*PP	-0,619338	0,069927	-8,86	0,0125*	-0,920211	-0,318465
FV*Bettrave	-0,0762	0,125842	-0,61	0,6064	-0,617653	0,4652528
PP*Bettrave	-0,347204	0,162267	-2,14	0,1657	-1,045381	0,3509728

➤ Effet sur la viscosité

Concernant la viscosité les résultats montrent un effet linéaire significatif de la féverole (X1) ($p < 0,05$) sur la viscosité du produit final, tandis que pour le pois chiche (X2) et la betterave (X3) aucun effet n'a été observé ($p = 0,1165$). De même, les effets interactifs de la féverole, betterave ($X_1 * X_3$), le pois chiche, la betterave ($X_2 * X_3$) et ($X_1 * X_2 * X_3$) féverole, pois chiche, betterave étaient insignifiants ($p = 0,0220$), ($p = 0,0162$) et ($p = 0,8861$) respectivement.

Ces résultats indiquent que pour améliorer la viscosité des boissons fermentées, il est préférable de privilégier l'utilisation individuelle ou combinée de la féverole et du pois chiche, en tenant compte de leur contribution respective. La betterave, bien que bénéfique pour d'autres propriétés comme l'acidité, n'apporte

pas une amélioration notable de la viscosité lorsqu'elle est utilisée seule ou en interaction avec les autres ingrédients.

Par ailleurs, ces résultats sont en accord avec les travaux de **Rohm et al. (1993)**, qui ont montré que la présence accrue de composants protéiques et d'amidons dans les formulations à base de légumineuses contribue à une augmentation significative de la viscosité des produits fermentés, en raison de leur capacité à retenir l'eau et à former des réseaux structurants lors de la fermentation.

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
(FV-0,4)/0,46	3,9447244	0,435601	9,06	0,0120*
(PP-0,1)/0,46	3,6330888	1,361781	2,67	0,1165
(Bettrave-0,04)/0,46	2,4583477	4,701376	0,52	0,6532
FV*PP*Bettrave	-2,6821	16,54458	-0,16	0,8861
FV*PP	5,8329672	4,51475	1,29	0,3255
FV*Bettrave	-3,761629	8,124759	-0,46	0,6889
PP*Bettrave	1,4659775	10,47648	0,14	0,9015

➤ Effet sur le taux de protéines

Les protéines sont des nutriments essentiels impliqués dans la structure et le fonctionnement des cellules vivantes, et elles constituent un paramètre de qualité nutritionnelle important pour les aliments fermentés à base de légumineuses.

Les résultats révèlent un effet non significatif des deux facteurs à savoir la féverole et le pois chiche sur la teneur finale en protéines des boissons fermentées ($p > 0,05$), bien qu'elles sont des sources végétales protéiques. Toutefois, l'effet interactif de féverole, pois chiche et la betterave était significatif $X_1 * X_2 * X_3$ ($p=0.05$), indiquant que certaines proportions combinées peuvent entraîner une réduction notable de la teneur en protéines, probablement à cause de déséquilibres nutritionnels ou d'interférences dans le processus de fermentation.

Par ailleurs, ces résultats sont en accord avec les travaux (**Tang et al., 2023**) qui ont montré que dans les boissons fermentées, les bactéries lactiques jouent un rôle clé dans le processus de fermentation. La fermentation des protéines de légumineuses par les bactéries lactiques implique une hydrolyse enzymatique spécifique qui modifie la composition, la structure et les propriétés fonctionnelles des protéines. Ce processus entraîne la décomposition des protéines en peptides plus petits et en acides aminés libres, améliorant ainsi leur digestibilité et leur biodisponibilité. Les modifications de la structure des protéines affectent également les propriétés physicochimiques du produit fermenté, ce qui peut améliorer sa texture et sa qualité nutritionnelle (**Tang et al., 2023**)

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
(FV-0,4)/0,46	0,4364632	0,383798	1,14	0,3733
(PP-0,1)/0,46	-0,092886	1,199834	-0,08	0,9453
(Bettrave-0,04)/0,46	8,2731638	4,142274	2,00	0,1839
FV*PP*Bettrave	-58,77696	14,57705	-4,03	0,0564
FV*PP	9,0196685	3,977842	2,27	0,1515
FV*Bettrave	-0,486792	7,158538	-0,07	0,9520
PP*Bettrave	-1,391093	9,230588	-0,15	0,8940

➤ Influence de la composition sur les composés phénoliques totaux

Les résultats obtenus montrent un effet linéaire significatif de X1(féverole), X2 (pois chiche) ($p < 0,05$) sur le taux des polyphénols de la boisson fermentée. de plus un effet interactif entre ces deux facteurs a été obtenu ($p < 0,0439$). Ce phénomène peut être expliqué non seulement par la richesse naturelle en composés phénoliques de ces légumineuses, mais aussi par l'activité des bactéries lactiques au cours de la fermentation.

Bien que les bactéries lactiques ne représentent qu'une petite partie du microbiote végétal autochtone, elles sont plus capables de modifier significativement les propriétés des aliments. En effet, la diversité des composants chimiques des plantes et les multiples voies possibles de bioconversion font de la fermentation un véritable labyrinthe métabolique parcouru par ces bactéries en impliquant plusieurs métabolites secondaires végétaux, notamment les composés phénoliques. Le succès de ces processus dépend de la capacité des bactéries lactiques à s'adapter et à survivre dans ce milieu, ce qui favorise la transformation des composés phénoliques en formes plus simples et souvent plus biodisponibles.

(Filannino, Di Cagno & Gobbetti, 2018). Ainsi, l'augmentation des composés phénoliques observée dans la boisson fermentée résulte d'une synergie entre la composition en légumineuses et l'activité métabolique des bactéries lactiques, qui participent activement à l'amélioration des qualités nutritionnelles et fonctionnelles du produit final.

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%
(FV-0,4)/0,46	1,4298274	0,006747	211,92	<,0001*	1,400798	1,4588569
(PP-0,1)/0,46	1,5211897	0,021092	72,12	0,0002*	1,4304375	1,611942
(Bettrave-0,04)/0,46	1,2534527	0,072818	17,21	0,0034*	0,9401421	1,5667632
FV*PP*Bettrave	2,0194335	0,256253	7,88	0,0157*	0,9168647	3,1220022
FV*PP	-0,619338	0,069927	-8,86	0,0125*	-0,920211	-0,318465
FV*Bettrave	-0,0762	0,125842	-0,61	0,6064	-0,617653	0,4652528
PP*Bettrave	-0,347204	0,162267	-2,14	0,1657	-1,045381	0,3509728

➤ Influence de la composition sur l'activité anti-DPPH

Les résultats obtenus indiquent que la féverole (X1), le pois chiche (X2) et la betterave (X3) n'ont pas un effet significatif sur la boisson fermentée (0.9, 0.7, 0.7). Cependant l'interaction entre ces trois facteurs $X_1 \times X_2 \times X_3$ ont un effet significatif ($p < 0,05$).

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
(FV-0,4)/0,46	-0,42767	3,818269	-0,11	0,9210
(PP-0,1)/0,46	-3,904443	11,93673	-0,33	0,7747
(Bettrave-0,04)/0,46	17,045128	41,21003	0,41	0,7193
FV*PP*Bettrave	-630,7453	145,0219	-4,35	0,0490*
FV*PP	78,606242	39,57415	1,99	0,1854
FV*Bettrave	60,148085	71,21777	0,84	0,4873
PP*Bettrave	108,36987	91,83187	1,18	0,3593

➤ Influence de la composition sur le développement des bactéries lactique (LAB)

Selon les résultats obtenus, les facteurs **X1, X2 et X3, la féverole, le pois chiche et la betterave** ont un effet significatif ($p < 0,05$). L'effet interactif a été observé entre $X_1 \times X_2 \times X_3$ ($p < 0,0183$) et $X_1 \times X_3$ ($p < 0,0220$) et $X_2 \times X_3$ ($p < 0,0162$). Les légumineuses fermentées ont souvent une valeur nutritionnelle plus élevée que les graines non fermentées car la fermentation peut améliorer la digestibilité des protéines et les valeurs nutritionnelles associées tout en augmentant la disponibilité biologique des fibres totales et des phénols ainsi que de vitamines, d'acides aminés, de minéraux et d'acides gras à chaîne courte (**Chavan et al. 2018**).

L'amélioration du profil nutritionnel des légumineuses lors de la fermentation LAB est principalement due à la libération d'acides aminés et de composés bioactifs, réduisant la quantité d'ANF par action directe (activation d'enzymes microbiennes) et indirecte (activation d'enzymes endogènes), tout en améliorant la digestibilité des protéines in vitro et le potentiel antioxydant. Les graines de féverole fermentées avec *Lactiplantibacillus plantarum subsp. Plantarum* ont montré une activité inhibitrice de la trypsine réduite, une condensation des tanins et une meilleure digestibilité des protéines in vitro.

Les LAB produisent divers acides organiques, tels que l'acide acétique, l'acide lactique et l'acide propionique, lors du métabolisme des ingrédients alimentaires, qui confèrent au produit un goût amer. Les acides organiques et des substances telles que l'alcool et les aldéhydes réagissent pour former divers composés aromatiques qui rehaussent le goût du produit fermenté (**Cichońska et Ziarno 2021**).

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
(FV-0,4)/0,46	6,3349446	0,186986	33,88	0,0009*
(PP-0,1)/0,46	4,5068516	0,584558	7,71	0,0164*
(Bettrave-0,04)/0,46	-8,264067	2,018112	-4,09	0,0548
FV*PP*Bettrave	-51,8347	7,101924	-7,30	0,0183*
FV*PP	6,4181493	1,938001	3,31	0,0803
FV*Bettrave	23,133333	3,487633	6,63	0,0220*
PP*Bettrave	34,884828	4,497134	7,76	0,0162*

❖ Sur la base des termes significatifs, les modèles mathématiques prédictifs étaient un modèle de régression du second ordre avec interaction comme suit :

$$Y(\text{pH}) = 4,41X_1 + 0,03X_2 - 0,045X_3 + 2,54X_1X_2 + 5,88X_1X_3 + 11,27X_2X_3 + 7,90X_1X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y(\text{Acidité Titrable}) = 1,43X_1 + 1,52X_2 - 1,25X_3 + 0,62X_1X_2 + 0,08X_1X_3 + 0,035X_2X_3 + 2,02X_1X_2X_3 \quad (2)$$

$$Y(\text{TPC}) = 88,91X_1 + 132,87X_2 - 127,826X_3 + 60,44X_1X_2 + 103,00X_1X_3 + 37,74X_2X_3 + 1074,96X_1X_2X_3 \quad (3)$$

$$Y(\text{DPPH}) = 0,43X_1 + 3,91X_2 - 17,45X_3 + 78,60X_1X_2 + 60,15X_1X_3 + 108,37X_2X_3 + 630,74X_1X_2X_3 \quad (4)$$

$$Y(\text{Totale LAB count}) = 6,33X_1 + 4,51X_2 - 8,26X_3 + 6,42X_1X_2 + 23,13X_1X_3 + 34,88X_2X_3 + 51,84X_1X_2X_3 \quad (5)$$

$$Y(\text{Viscosité}) = 3,94X_1 + 3,63X_2 - 2,46X_3 + 5,83X_1X_2 + 3,76X_1X_3 + 1,46X_2X_3 + 2,68X_1X_2X_3 \quad (6)$$

$$Y(\text{Protéine}) = 0,44X_1 + 0,09X_2 - 8,27X_3 + 9,02X_1X_2 + 0,49X_1X_3 + 1,39X_2X_3 + 58,77X_1X_2X_3 \quad (7)$$

Il est à noter que la valeur p peut être utilisée pour vérifier la force de l'interaction entre les facteurs indépendants. D'après cette analyse, une valeur $p < 0,0001$ indiquait que les modèles étaient significatifs, ce qui signifie que le modèle représentait les données de manière satisfaisante.

Le coefficient de détermination (R^2) et le coefficient de détermination ajusté (R^2_{adj}) étaient respectivement de R^2 (0,98, 0,99, 0,98, 0,98, 0,99, 0,98 et 0,98) et de R^2_{adj} (0,93, 0,96, 0,92, 0,93, 0,93, 0,93 et 0,93). De plus, la faible valeur du coefficient de variance (CV) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) indique un bon degré de corrélation entre les valeurs expérimentales et prédites. Les modèles mathématiques polynomiaux du second ordre ont été considérés comme valides compte tenu des intervalles recommandés par Bas et Boyaci.

IV.1.2. Analyse de triangle de mélange

L'effet des variables indépendantes sur les caractéristiques des formules de la boisson végétale fermentée peut être mis en évidence par un graphique de contour triangulaire.

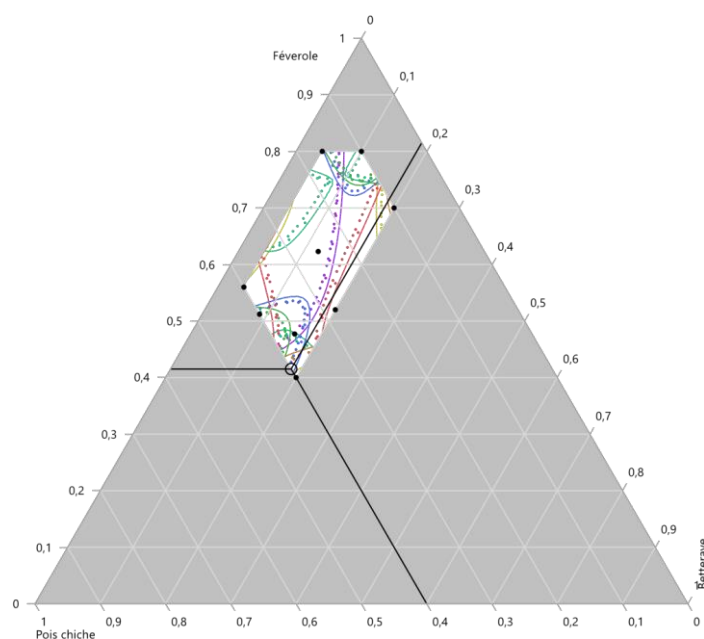


Figure 4: Graphique de contours triangulaire tridimensionnel illustrant l'effet de la fèverole (X₁), du pois chiche (X₂) et de la betterave (X₃) sur les réponses.

La figure (4) décrit la variation des réponses en fonction de la composition du mélange et indique clairement que les caractéristiques physicochimiques, phytochimiques et microbiologique sont principalement améliorées par une proportion accrue de fèverole et de pois chiche (X₁ et X₂). Une quantité plus faible de betterave (X₃) était meilleure pour la qualité sensorielle des formules de la boisson. La boisson fermentée optimale pourrait offrir une meilleure nutrition aux consommateurs grâce à la substitution totale de la betterave par la fèverole et de pois chiche.

IV.1.3. Validation et vérification du modèle prédictif

Selon les résultats de profil de mélange et les prédictions de ce modèle, les conditions optimales ont été obtenues pour les conditions suivantes : 10,5 g de fèverole (42%), 10g de poids chiche (40%) et 4,5g (18%) de betterave, une nouvelle vérification expérimentale a été effectuée en utilisant ces conditions optimales déduites. Les valeurs prédites et expérimentales des caractéristiques sensorielles de la boisson

fermentée préparée sont représentées dans le tableau (**Tableau VI**). Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les valeurs expérimentales et prédites ($p \geq 0,05$). Cette forte corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites indique que la réponse du modèle de régression est adéquate pour la formulation de notre boisson à base des légumineuses (féverole, pois chiche) et la betterave.

Tableau VI: Comparaison des valeurs expérimentales et prédites des réponses sensorielles

	Valeur expérimentale	Valeur prédite
pH	4,9±0,01	4,35
Acidité titrable	1,48	1,36
TPC	49,43	58,42
DPPH	24,57	22,65
LAB	8,13	7,71
Viscosité	3,15	3.65
Protéines	1,4	2,01

IV.2.Analyse sensorielle

Pour l'analyse sensorielle, avant d'effectuer les différents tests sur XLSTAT, un plan d'expérience a été réalisé. Une fois les données des jurys experts sont rapportées sur le logiciel ; la procédure de génération d'un plan d'expérience est lancée.

IV.2.1.Caractérisation de produit

La caractérisation de produit permet de décrire les caractéristiques organoleptiques des produits en se basant sur les résultats du panel expert. Elle permet également d'identifier quels sont les descripteurs qui discriminent le mieux les produits et quelles sont les caractéristiques qui ne varient pas significativement entre les échantillons analysés (**Husson et Pages, 2009**).

A. Pouvoir discriminant par descripteur

Les résultats de ce test sont illustrés dans la **figure (5)**, il permet d'afficher les descripteurs ordonnés du plus discriminant au moins discriminant sur les neuf échantillons de boissons analysés.

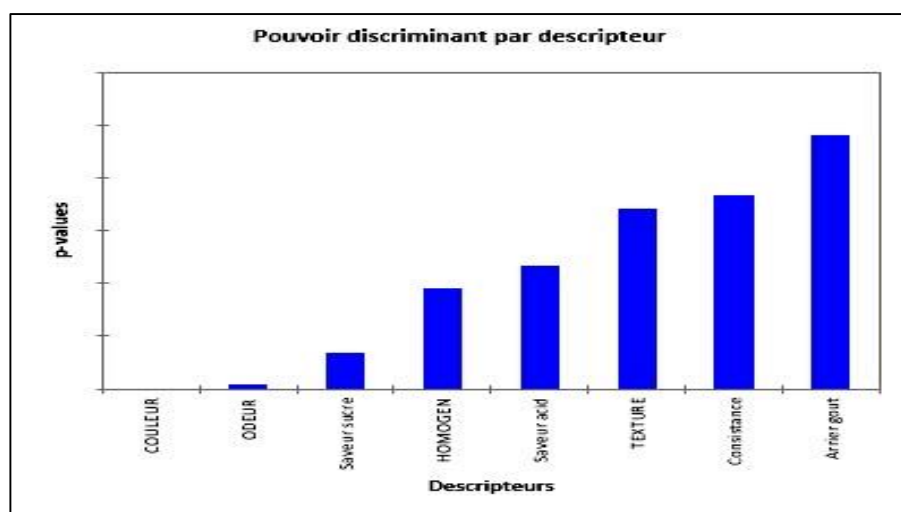


Figure 5: Pouvoir discriminant par descripteur.

Le graphe précédent permet de visualiser que la couleur et l'odeur sont les descripteurs les plus discriminants, c'est-à-dire que ces caractéristiques diffèrent entre les neuf boissons. Par contre, le descripteur le moins discriminé est l'arrière-goût cela veut dire qu'il n'y a pas de différence entre les neuf échantillons pour l'arrière-goût.

B. Coefficients des modèles

La **figure (6)** présente, pour chacun des neuf produits de boissons, les coefficients des modèles sensoriels correspondant à chaque descripteur. Cette représentation visuelle permet d'identifier rapidement les caractéristiques déterminantes de chaque produit.

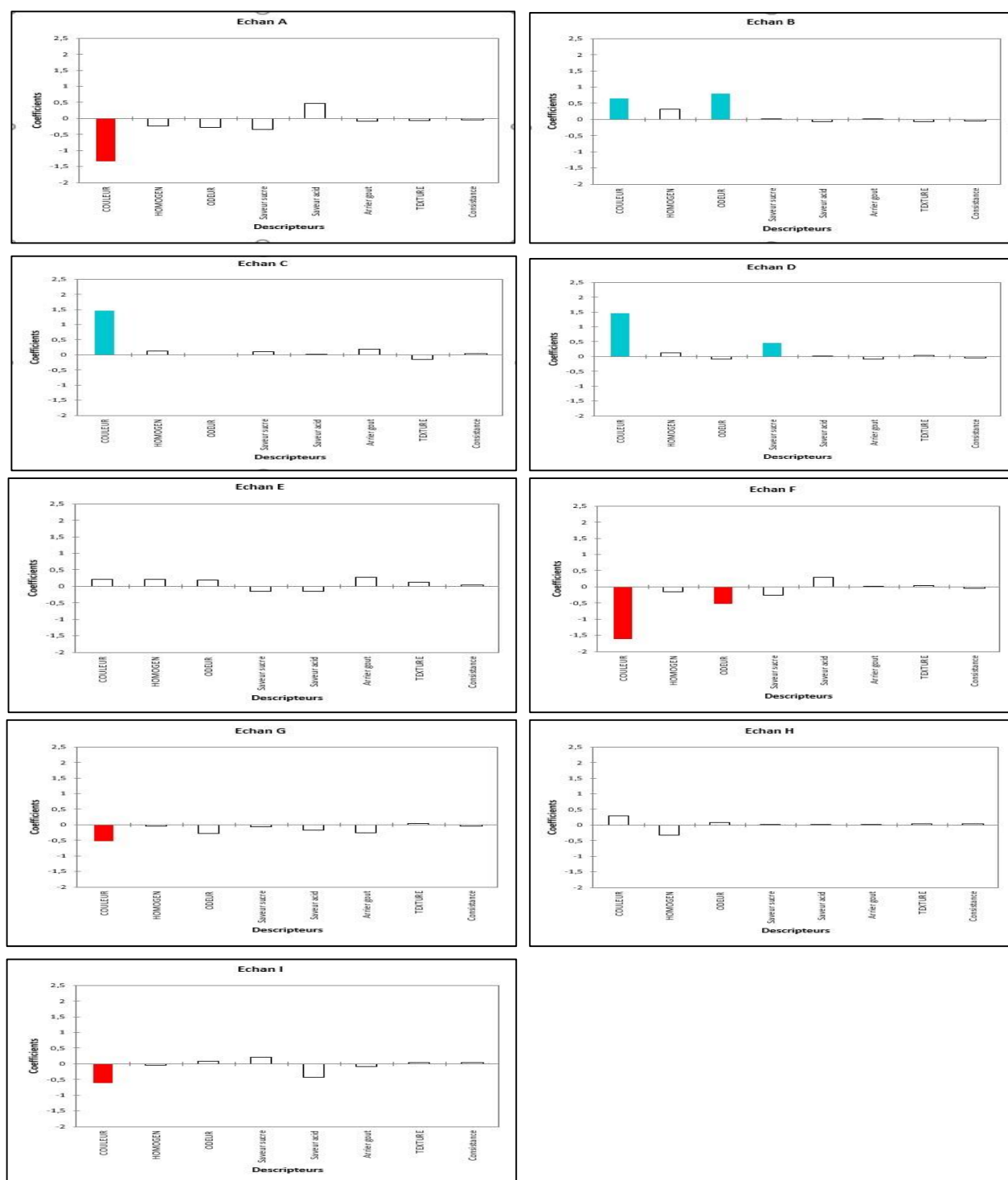


Figure 6: Coefficients des modèles des échantillons de boissons à base de légumineuses

Les coefficients significativement positifs sont indiqués en bleu, traduisant une influence favorable sur la perception sensorielle. Les coefficients significativement négatifs sont représentés en rouge, témoignant

D'un effet défavorable. Enfin, les caractéristiques non significatives, en blanc, indiquent une absence d'effet marqué, les notes se rapprochant de la moyenne générale.

Le produit A : Ce produit est défini par un seul descripteur significatif : la couleur, avec un coefficient positif. Cela suggère une bonne perception visuelle du produit par les juges. Les autres caractéristiques (odeur, texture, saveur, etc.) ne présentent aucun effet significatif, traduisant une perception globale plutôt neutre sur les autres plans sensoriels.

Le produit B : Le produit B se distingue par deux caractéristiques sensorielles significativement positives : la couleur et l'odeur. Cette double appréciation, visuelle et olfactive, indique une bonne acceptabilité initiale, qui pourrait renforcer l'intérêt des consommateurs.

Le produit C : Seule la couleur est jugée significativement positive pour ce produit. Les autres descripteurs ne se différencient pas de la moyenne, ce qui traduit une perception globalement neutre, mais valorisée par une bonne apparence visuelle.

Le produit D : Ce produit se caractérise par deux descripteurs positifs significatifs : la couleur et la saveur sucrée. Il semble donc cumuler une bonne attractivité visuelle et une appétence gustative, deux éléments clés pour l'acceptabilité d'un produit fermenté souvent jugé trop acide ou amer.

Les échantillons E et H : Ces deux produits n'affichent aucun coefficient significatif. Toutes les caractéristiques sont représentées en blanc, traduisant une homogénéité des notes autour de la moyenne. Autrement dit, aucun descripteur sensoriel ne domine ou ne dégrade la perception, mais aucun ne se démarque non plus. Ces profils peuvent être perçus comme plats ou peu expressifs.

Le produit F : Ce produit présente deux caractéristiques négatives significatives : la couleur et l'odeur. Ces résultats indiquent une perception visuelle et olfactive défavorable, susceptibles d'impacter négativement l'acceptabilité globale du produit.

Le produit G : Le seul descripteur significatif pour ce produit est la couleur, mais avec un coefficient négatif. Les autres descripteurs ne présentent pas de variation significative. Ce résultat suggère une perception visuelle défavorable, tandis que les autres aspects sensoriels restent neutres.

Le produit I : Ce produit montre également une seule caractéristique significative : la couleur, avec un coefficient négatif. Cela indique une mauvaise perception visuelle, sans que d'autres descripteurs ne compensent cette faiblesse.

La saveur sucrée est positivement significative uniquement pour le produit D, ce qui indique une préférence des juges pour ce goût dans cet échantillon. Pour les autres produits, cette caractéristique n'est pas significative, ce qui laisse penser qu'elle n'a pas influencé de manière marquée leur évaluation.

Enfin, les descripteurs homogénéité, consistance, texture en bouche, saveur acide et arrière-goût ne présentent aucune significativité pour l'ensemble des produits analysés. Cela indique que ces

Caractéristiques sont perçues de manière similaire entre les différents échantillons, et qu'elles n'ont pas contribué à leur différenciation sensorielle.

IV.2.2. Cartographie externe de préférence (PREFMAP)

Cette méthode permet de relier les préférences exprimées par les consommateurs aux caractéristiques organoleptiques des produits déterminés par le panel expert. Cette approche est essentielle car c'est sur cette base que les équipes marketing pourront adapter les produits aux goûts des consommateurs.

La préférence MAPPING permet de visualiser sur une même représentation graphique (en deux ou trois dimensions) d'une part des objets, et d'autre part des indications montrant le niveau de préférence des produits par le consommateur.

A. Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP peut être considéré comme une méthode de projection qui permet de projeter les observations, depuis l'espace à p dimensions des p variables vers un espace à k dimension.

($k < p$) tel qu'un maximum d'information soit conservé (l'information est ici mesurée à travers la variance totale du nuage de points) sur les premières dimensions. Les observations peuvent être représentées sur un graphique à 2 ou 3 dimensions, facilitant ainsi grandement l'interprétation (Jolliffe, 2002).

La **figure(7)** permet de représenter les corrélations entre les variables et les facteurs

par l'ACP :

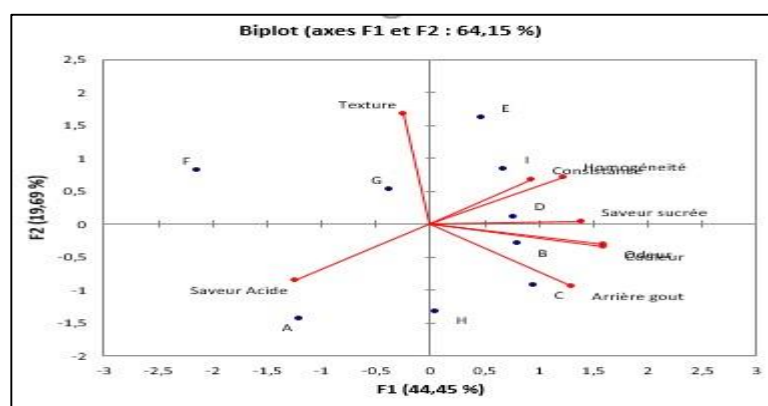


Figure 7:Corrélation entre les variables et les facteurs des boissons

Ces résultats suggèrent que le **produit A** est principalement défini par ses caractéristiques gustatives. Il est probable que ce produit présente une saveur acide marquée, ce qui pourrait expliquer sa position sur la carte PREFMAP.

Les **produits F et G** semblent partager une texture en bouche similaire, indiquant des attributs texturaux distinctifs qui les différencient des autres échantillons. Cette similarité pourrait être liée à une sensation tactile en bouche plus prononcée ou spécifique.

Les **produits B, C et H** sont regroupés autour des descripteurs couleur, odeur et arrière-goût, ce qui révèle une cohérence sensorielle globale fondée sur des qualités visuelles, olfactives et gustatives bien perçues.

Enfin, les produits **E, I et D** sont associés principalement à la consistance et à l'homogénéité, suggérant que leurs propriétés texturales internes constituent leur trait distinctif majeur. Ces aspects semblent dominer la perception sensorielle de ces produits.

B. Cartographie de préférence PREFMAP

Ce test a été effectué afin de déterminer les préférences des consommateurs concernant nos produits et de comprendre les raisons de leurs choix.

Les courbes de niveau et la carte de préférence est illustrée dans la **figure (8)**.

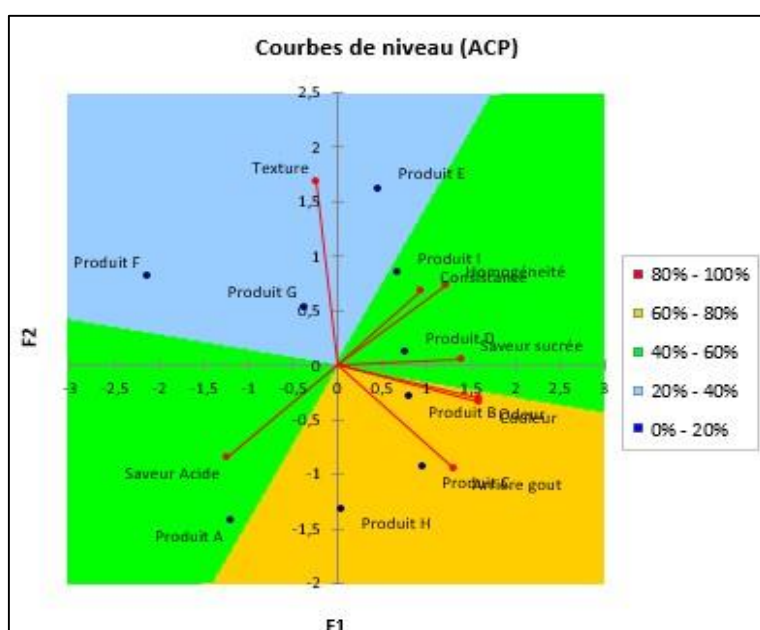


Figure 8: Carte de préférence PREFMAP

D'après la **figure (8)**, les produits **H**, **B** et **C** se situent dans une même zone de la carte de préférence, indiquant qu'ils ne sont pas perçus comme significativement différents par les jurys. Ces produits sont préférés par 60 à 80 % des panélistes, ce qui en fait les échantillons les plus appréciés. Ils sont suivis des produits **A**, **I** et **D**, qui bénéficient d'un niveau de préférence modéré, avec un taux d'adhésion situé entre 40 et 60 % des jurys.

Enfin, les produits **E**, **F** et **G** forment un groupe distinct, perçus comme similaires entre eux, mais moins appréciés, puisqu'ils ne sont préférés que par 20 à 40 % des panélistes. Ces résultats suggèrent une acceptabilité sensorielle plus faible pour ce dernier groupe d'échantillons.

Conclusion et perspectives

L'objectif principal de cette étude était d'optimiser la formulation d'une boisson fermentée à base de légumineuses (féverole et pois chiche) et de betterave, en étudiant l'impact de plusieurs facteurs sur ses propriétés physico-chimiques, microbiologiques, nutritionnelles et sensorielles. La démarche expérimentale a permis d'évaluer l'effet de ces ingrédients, ainsi que des paramètres de fermentation, afin de déterminer les conditions optimales pour produire une boisson à la fois nutritive, saine et agréable au goût.

Les résultats obtenus ont démontré que la féverole et le pois chiche jouent un rôle significatif dans la modulation de plusieurs caractéristiques essentielles du produit final. Plus précisément, ils influencent fortement le pH, l'acidité, la teneur en composés phénoliques, l'activité antioxydante ainsi que la viscosité de la boisson. La betterave, quant à elle, a principalement impacté les paramètres liés au pH et à l'acidité, apportant une coloration naturelle et une composante diététique enrichie en antioxydants.

Les analyses statistiques, notamment à travers l'utilisation de modèles de réponse, ont confirmé la validité des formulations proposées, mettant en évidence des interactions importantes entre les différents ingrédients. Ces modèles ont permis d'identifier des conditions optimales de formulation, en maximisant des propriétés nutritionnelles et sensorielles tout en maintenant la stabilité microbiologique et la qualité organoleptique du produit.

La validation expérimentale de ces conditions optimales (10,5g de féverole, 10g de pois chiche et 4,5g de betterave) a montré une bonne concordance avec les prédictions du modèle, avec des coefficients de corrélation élevés. Cela confirme la pertinence de la démarche d'optimisation et la fiabilité du modèle pour la formulation de la boisson. Par ailleurs, l'étude a également mis en évidence que la fermentation lactique contribue à enrichir la boisson en composants probiotiques et à améliorer ses qualités nutritionnelles, tout en modulant son profil sensoriel pour une acceptabilité accrue.

Cette recherche ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de nouvelles boissons fonctionnelles, combinant l'apport des légumineuses et de légumes riches en antioxydants. La formulation optimisée pourrait répondre aux attentes des consommateurs en matière de santé, de bien-être et de plaisir gustatif, tout en offrant une alternative innovante aux boissons traditionnelles. À l'avenir, il serait pertinent d'étudier la stabilité à long terme de ces produits, leur panel sensoriel élargi, et leur potentiel de commercialisation sur différents marchés.

Conclusion

En conclusion, cette étude constitue une étape importante dans la valorisation des légumineuses et des légumes racines dans la fabrication de produits fermentés, en proposant une solution à la fois nutritive, fonctionnelle et adaptée aux tendances actuelles de consommation saine et naturelle.

A

Allaire, H. and Brady, T. (2008). Classification and Botanical Description of Legumes, Retrieved on April 24, 2020 from web site Hamilton College https://academics.hamilton.edu/foodforthought/our_research_files/beans_peas.pdf.

Allaire, H. and Brady, T. (2008). Classification and Botanical Description of Legumes, Retrieved on April 24, 2020 from website Hamilton College.

Alonso r., Aguirre a., Marzo f., 2000. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chemistry*, 68 : 159-165.

Alonso R., Rubio L.A., Muzquiz M., Marzo F., 2001. The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals. *Animal Science and Technology*, 94 : 1-13.

Amit, P., Devraja, H.C., Prateek S. and Singh, R.R. (2020). Food Technology-II. Retrieved September 3,2020, from Food Technology.

Andriamitantsoa M.H., 2007. Mise en place d'un procédé de torréfaction du soja dans la ville de Toliara et essai en alimentation des poules pondeuses et poulets de chair. Ecole Supérieur de Sciences Agronomiques, option ou département des industries agricoles et alimentaires, p : 23-24.

Andriamitantsoa M.H., 2007. Mise en place d'un procédé de torréfaction du soja dans la ville de Toliara et essai en alimentation des poules pondeuses et poulets de chair. Ecole Supérieur de Sciences Agronomiques, option ou département des industries agricoles et alimentaires, p : 23-24.

Anumudu, C. K., Miri, T., & Onyeaka, H. (2024). Multifunctional Applications of Lactic Acid Bacteria: Enhancing Safety, Quality, and Nutritional Value in Foods and Fermented Beverages. *Foods*, 13(23), 3714. <https://doi.org/10.3390/foods13233714>.

Ayivi, R.D.; Ibrahim, S.A. Lactic Acid Bacteria: An Essential Probiotic and Starter Culture for the Production of Yoghurt. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022, 57, 7008–7025.

Aykroyd W.R., Doughty J., 1964. Les graines des légumineuses dans l'alimentation humaine.

Ayivi, R. D., Gyawali, R., Krastanov, A., Aljaloud, S. O., Worku, M., Tahergorabi, R., Silva, R. C. da, & Ibrahim, S. A. (2020). Lactic acid bacteria : Food safety and human health applications. *Dairy*, 1(3), 202-232.

B

Battcock M. and Azam-Ali S. (1998). Fermented fruits and vegetables.

A global perspective. FAO. Agricultural Services Bulletin No. 134. M-17. ISBN 92-51042268

Benkiran, M. (2023). Potential benefits of fermented foods in type 2 diabetes.(Cuamatzin-García et al. 2022).

Boye J., Zare, F. et Pletch A. (2010). Pulse proteins : Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43(2), 414-431.

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72(1-2), 248-254.

Bautista-Gallego, J., Medina, E., Sánchez García, B., Benítez-Cabello, A., & Arroyo López, F. N. (2020). *Role of lactic acid bacteria in fermented vegetables*. <https://digital.csic.es/handle/10261/223126>

C

Cakir, O., Ucarli, C., Tarhan, C., Pekmez, M. and Turgut -Kara, N. (2019). Nutritional and health benefits of legumes and their distinctive genomic properties. *Food Science and Technology*, 39(1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/fst.42117>.

Champagne, C.E.M., Goliber, T.E., Wojciechowski, M.F., Mei, R.W., Townsley, B.T., Wang, K. and Sinha, N.R. (2007). Compound leaf development and evolution in the legumes. *Plant Cell*, 19(11), 3369–3378. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.052886>.

Chavan, J.K., Kadam, S.S., 1989. Nutritional improvement of cereals by sprouting , *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 28 : 401-37.

Coda 2015, R., Melama, L., Rizzello, CG, Curiel, JA, Sibakov, J., Holopainen, U. et al. (2015). Effet de la classification de l'air et de la fermentation par *Lactobacillus plantarum* VTT E133328 Consommation de féverole. *Tendances en science et technologie alimentaires*, 91, 549–556.

Cuamatzin-García, L. Rodríguez-Rugarcía, P. El-Kassis, Eg. « et col. » Traditional fermented foods and beverages from around the world and their health benefits. *Microorganisms*, 2022, 10, 1151, doi: 10.3390/microorganisms10061151. [Brèves scientifiques](#) Publié le 19/09/2022

Caric, M., Milanovic, S., & Vucelja, D. (2000). Standard methods for milk and milk products analysis. *Novi Sad, Srbija*.

Chekdid, A. A., Kahn, C. J. F., Prévot, E., Ferrières, M., Lemois, B., Choquet, C., & Linder, M. (2021). Mixture design applied for formulation and characterization of vegetal-based fermented products. *LWT*, 146, 111336.

Chekdid, A. A., Kahn, C. J. F., Prévot, E., Ferrières, M., Lemois, B., Choquet, C., & Linder, M. (2021). Mixture design applied for formulation and characterization of vegetal-based fermented products. *LWT*, 146, 111336. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111336>

Cichońska, P., & Ziarno, M. (2021). Legumes and Legume-Based Beverages Fermented with Lactic Acid Bacteria as a Potential Carrier of Probiotics and Prebiotics. *Microorganisms*, 10(1), 91.

Chavan, Mayuri, Yogesh Gat, Mugdha Harmalkar, et Roji Waghmare. 2018. « Development of Non-Dairy Fermented Probiotic Drink Based on Germinated and Ungerminated Cereals and Legume ». *LWT* 91: 339-44. doi:10.1016/j.lwt.2018.01.070

Cichońska, Patrycja, et Małgorzata Ziarno. 2021. « Legumes and Legume-Based Beverages Fermented with Lactic Acid Bacteria as a Potential Carrier of Probiotics and Prebiotics ». *Microorganisms* 10(1): 91. doi:10.3390/microorganisms10010091

D

Dudonné, S., Vitrac, X., Coutière, P., Woillez, M., & Mérillon, J.-M. (2009). Comparative Study of Antioxidant Properties and Total Phenolic Content of 30 Plant Extracts of Industrial Interest Using DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC Assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), 1768-1774.

<https://doi.org/10.1021/jf803011r>

Durukan, G., Sari, F., & Karaoglan, H. A. (2024). A beetroot-based beverage produced by adding *Lactobacillus paracasei* : An optimization study. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 16(3), 10-24. <https://doi.org/10.15586/qas.v16i3.1499>

E

Edem, D.O., Ekwere, S., Eka O.U., 1994. Chemical evaluation of the effects of cooking on the nutritive value of Conophor seeds (*Tetracarpidium conophorum*). *Pakistan journal of nutrition*, 8(3) : 225-226.

Effect of soaking and heat processing on the levels of antinutrients and digestible proteins in seeds of *Vigna aconitifolia* and *Vigna sinensis*. *Food Chemistry*, 63 : 259- 264.

Escobar-Sáez, D. Montero-Jiménez L., García-Herrera P., Sánchez-Mata M.C (2022) Plant-based drinks for vegetarian or vegan toddlers: Nutritional evaluation of commercial products, and review of health benefits and potential concerns, *Food Research International*, Volume 160,

Etemadi, F., Hashemi, M., Barker, AV, Zandvakili, OR, et Liu, X. (2019). Agronomie, valeur nutritionnelle et applications médicinales de la féverole (*Vicia faba* L.). *Horticultural Plant Journal*, 5(4), 170–182.

F

Fao, 2016. Les avantages nutritionnels des légumineuses. *Nutrition*. p 2.

Filannino, P., Di Cagno, R., & Gobbetti, M. (2018). Metabolic and functional pathways of lactic acid bacteria in plant foods: get out of the labyrinth. *Food Microbiology*, 71, 13-22.

Fredlund, K., Asp, N.G., Larsson, M., Marklinder I., Sandberg, A.S., 1997. Phytate reduction in whole grains of wheat, rye, barley and oats after hydrothermal treatment. *J. Cereal Science*, 25 : 83-91.

G

Gibson R S., Hötzel C., 2001. Dietary diversification/modification strategies to enhance micronutrient content and bioavailability of diets in developing countries. *British Journal of Nutrition* 85 : 159-166.

Gilham, B., Hall, R. and Woods, J.L. (2018). Vegetables and legumes in new Australasian food launches : how are they being used and are they a healthy choice ? *Nutrition Journal*, 17, 104.s12937-018-0414-2 -9

Gonzalo G; Mateos, Maria A. L; Rosa L, 2002. Traitement de la graine de soja American Soybean Association, 3 : 1-48.

H

Hidalgo-Fuentes, B., de Jesús-José, E., Cabrera-Hidalgo, A. D. J., Sandoval-Castilla, O., Espinosa-Solares, T., González-Reza, R. M., ... & Aguilar-Toalá, J. E. (2024). Plant-based fermented beverages: nutritional composition, sensory properties, and health benefits. *Foods*, 13(6), 844.

Hamioud, A., Benmeziame, F., & Djermoune-Arkoub, L. (2025). Chickpea milk : Nutritional profile, functional characteristics, bioactive compounds, and quality enhancement: A comprehensive review. *Food and Feed Research*, 00, 66-66.

Husson F., Le S. & et Pages J. (2009). Evaluation sensorielle – Manuel.

I

Ipekese S, Basdemir F, Tunc M, Bicer BT. Minerals, vitamins, protein and amino acids in wild Cicer species and pure line chickpea genotypes selected from a local population.

J

J Elem. (2022) 27 : 127–40 Iqbal A, Khalil IA, Ateeq N, Khan MS. Qualité nutritionnelle des aliments importants.

Jennings, J. and Foster, J. (2020). Legume Structure and Morphology. In Moore, K.J., Collins, M., Nelson, C.J. and Redfearn, D.D. (Eds.) *Forages : The Science of Grassland Agriculture*, p. 51–64. United Kingdom : Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch3>
Jolliffe P., Jolliffe T. & Jones B. (2002). *Statistical inference*.

K

Kaur K, Grewal SK, Gill PS, Singh S. Comparaison des génotypes de pois chiches cultivés et sauvages pour leur qualité nutritionnelle et leur potentiel antioxydant. *J Food Sci Technol.* (2019) 56 :1864– 76. Doi : 10.1007/ s13197019036464.

Khazaei, H., Purves, RW, Hughes, J., Link, W., O'Sullivan, DM, Schulman, AH, et al. (2019). Élimination de la vicine et de la convicine, principaux facteurs antinutritionnels limitant la consommation de féverole. *Tendances en science et technologie alimentaires*, 91, 549–556.

Kurbanova, I., Lauciene, L., Kondrotiene, K., Zakariene, G., Radenkovs, V., Kiseliuviene, S., Salaseviciene, A., Vasiliauskaite, A., Malakauskas, M., Musulmanova, M., & Serniene, L. (2024). Physicochemical, Sensory, and Microbiological Analysis of Fermented Drinks Made from White Kidney Bean Extract and Cow's Milk Blends during Refrigerated Storage. *Microorganisms*, 12(9), 1832. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091832>.

Kwon, S., Lee, PC, Lee, EG, Chang, YK, & Chang, N. (2000). Production d'acide lactique par *Lactobacillus rhamnosus* avec un hydrolysate de soja vitaminé. *Enzyme and Microbial Technology*, 26, 209–215.

L

Laleg K., Barron C., Santé-Lhoutellier V., Walrand S., et Micard V. (2016). Protein enriched pasta : Structure and digestibility of its protein network. *Food & Function*, 7(2), 11961207. <https://doi.org/10.1039/C5FO01231G>.

Lazaro R., Mateos G.G., Angeles M.A., 2002. Traitement de la graine de soja, 23p.
Légumineuses. *Food Chem.* (2006) 97:331– 5. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.05.011.

Lestienne I, 2004. Contribution à l'étude de la biodisponibilité du fer et du zinc dans le grain de mil et conditions d'amélioration dans les aliments de complément. (Thèse). Montpellier : Université de Montpellier II. 303p.

Lopes, M., Pierrepont, C., Duarte, C. M., Filipe, A., Medronho, B., & Sousa, I. (2020). Legume Beverages from Chickpea and Lupin, as New Milk Alternatives. *Foods*, 9(10), 1458. <https://doi.org/10.3390/foods910145>

M

Ma Z., Boye J. I., Simpson B. K., Prasher S. O., Monpetit, D. et Malcolmson L. (2011). Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours. *Food Research International*, 44(8), pp.2534-2544.

Manickavasagan A., et Thirunathan P. (2020). Pulses : Processing and Product Development. *Springer International Publishing*.

Maphosa, Y. and Jideani, V.A. (2017). The rôle of legumes in human nutrition. In Hueda, M.C. (Ed.) *Functional Food – Improve Health through Adequate Food*. InTech Open E-Book. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69127>.

McCrory, M.A., Hamaker, B.R., Lovejoy, J.C. and Eichelsdoerfer, P.E. (2010). Pulse consumption, satiety, and weight management. *Advances in Nutrition*, 1(1), 17-30. <https://doi.org/10.3945/an.110.1006>.

Monnet A.-F., Laleg K., Michon C. et Micard V. (2019). Legume enriched cereal products : A generic approach derived from material science to predict their structuring by the process and their final properties. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 131143.

Moretto, L., Tonolo, F., Folda, A., Scalcon, V., Bindoli, A., Bellamio, M., Feller, E., & Rigobello, M. P. (2021). Comparative analysis of the antioxidant capacity and lipid and protein oxidation of soy and oats beverages. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(1), 1.

Moradi, M., Kousheh, S. A., Almasi, H., Alizadeh, A., Guimarães, J. T., Yılmaz, N., & Lotfi, A. (2020). Postbiotics produced by lactic acid bacteria : The next frontier in food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3390-3415. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12613>

Moretto, L., Tonolo, F., Folda, A., Scalcon, V., Bindoli, A., Bellamio, M., Feller, E., & Rigobello, M. P. (2021). Comparative analysis of the antioxidant capacity and lipid and protein oxidation of soy and oats beverages. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(1), 1.

N

Nawaz, M. A., Tan, M., Øiseth, S., & Buckow, R. (2022). An Emerging Segment of Functional Legume-Based Beverages : A Review. *Food Reviews International*, 38(5), 1064-1102. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762641>

P

Patil, N. D., Bains, A., Sridhar, K., Rashid, S., Kaur, S., Ali, N., ... & Sharma, M. (2024). Effect of sustainable pretreatments on the nutritional and functionality of chickpea protein: Implication for innovative food product development. *Journal of Food Biochemistry*, 2024(1), 5173736.

Pochopień, J. (2024). The Possibility of Using *Lactobacillus plantarum* 299v to Reinforce the Bioactive Properties of Legume-Derived Beverages. *Applied Sciences*, 14(12), 5187. <https://doi.org/10.3390/app14125187>

Polak R., Phillips E. M. et Campbell A. (2015). Legumes : Health Benefits and Culinary Approaches to Increase Intake. *Clinical Diabetes*, 33(4), 198205.

Paul, A. A., Kumar, S., Kumar, V., & Sharma, R. (2020). Milk Analog : Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(18), 3005-3023. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1674243>

R

Rochfort, S., et Panozzo, J. (2007). Phytochimiques pour la santé : le rôle des légumineuses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 7981–7994.

Rohm, H., Zwickl, H., & Ullrich, W. (1993). *Effect of selected milk components on the rheological properties of fermented milk products*. *Milchwissenschaft*, 48(7), 385–388.

S

SanjeewaW.,WanasundaraJ.,PietrasikZ.,ShandP.(2010).« CharacterizationOfchickpea (*Cicer arietinum* L.) Flours and application in low-fatporkbologna as a Modelsystem.»*FoodResearchInternational*,43(2),617-626.

Skrzypczak, Katarzyna, Dorota Teterycz, Waldemar Gustaw, Dorota Domagała, Przemysław Mielczarek, et Joanna Kasprzyk-Pochopień. 2024. « The Possibility of Using *Lactobacillus Plantarum* 299v to Reinforce the Bioactive Properties of Legume-Derived Beverages ». *Applied Sciences* 14(12): 5187. doi:10.3390/app14125187.

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.

Skrzypczak, K., Teterycz, D., Gustaw, W., Domagała, D., Mielczarek, P., & Kasprzyk-Pochopień, J. (2024). The Possibility of Using *Lactobacillus plantarum* 299v to Reinforce the Bioactive Properties of Legume-Derived Beverages. *Applied Sciences*, 14(12), 5187.

Skrzypczak, K., Jabłońska-Ryś, E., Gustaw, K., Sławińska, A., Waśko, A., Radzki, W., MichalakMajewska, M., & Gustaw, W. (2019). Reinforcement of the antioxidative properties of chickpea beverages through fermentation carried out by probiotic strain *Lactobacillus plantarum* 299v. *J. Pure Appl. Microbiol*, 13, 1-12.

Skrzypczak, K., Teterycz, D., Gustaw, W., Domagała, D., Mielczarek, P., & Kasprzyk-Pochopień, J. (2024). The Possibility of Using *Lactobacillus plantarum* 299v to Reinforce the Bioactive Properties of Legume-Derived Beverages. *Applied Sciences*, 14(12), 5187. <https://doi.org/10.3390/app14125187>

T

Tang, C.-H., Wang, X.-S., & Chen, H. (2023). Legume protein fermented by lactic acid bacteria: Specific enzymatic hydrolysis, protein composition, structure, and functional properties. *Food Chemistry*, 412, 135442.

Turco, I., Ferretti, G. et Bacchetti, T. (2016). Revue des bienfaits des polyphénols de la féverole (*Vicia faba* L.) pour la santé. *Journal of Food & Nutrition Research*, 55.

Thakur, S., Pandey, A. K., Verma, K., Shrivastava, A., & Singh, N. (2024). Plant-based protein as an alternative to animal proteins : A review of sources, extraction methods and applications. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(1), 488-497.

Thorat, P. P., Sadawarte, S. K., Sawate, A. R., & Machewad, G. M. (2017). Studies on effect of fermentation on physicochemical properties of vegetables and preparation of sauce. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(8), 3537-3545.

V

Vijayakumari, K., Siddhuraju P., Pugalenth M., Janardhanan K.,1998

Vohra, K., Garg, V. and Dureja, H. (2019). Microscopic studies on *Lens Culinaris Medikus* seeds using bright-field microscope and polarized light microscope. *Plant Archives*, 19(2), 1980-1986.

Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T. & Bezirtzoglou, E. (2020). Fermentative foods: Microbiology, biochemistry, potential human health benefits and public health issues. *Foods*, 10(1), 69.

Y

Yang, X., Hong, J., Wang, L., Cai, C., Mo, H., Wang, J., Fang, X., & Liao, Z. (2024). Effect of lactic acid bacteria fermentation on plant-based products. *Fermentation*, 10(1), 48.

Z

Zhao X, Sun L, Zhang X, Wang M, Liu H, Zhu Y. Nutritional components, volatile constituents and antioxidant activities of 6 chickpea species. *Food Biosci.* (2021) 41 :100964. doi :10.1016/j.fbio.2021.100964.

Annexe1

Questionnaire d'analyse sensorielle d'une boisson végétale (Panel expert)

Date :

Age :

Profession :

Sexe : F ☐ M ☐

Dans le cadre d'une analyse sensorielle d'une boisson végétale, 9 échantillons vous sont présentés codés A, B, C, D, E, F, G, H et I, il vous est demandé de les examiner et de les goûter successivement, puis répondre aux questions qui suivent en attribuant une note de 1 à 5 selon l'échelle présentée pour chaque paramètre

1. Couleur

- (1) Très claire
- (2) Claire
- (3) Moyennement foncée
- (4) Foncée
- (5) Très foncée

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

2. Homogénéité

- (1) Absente
- (2) Faible
- (3) Moyenne
- (4) Forte
- (5) Très forte

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

3. Odeur

- (1) Absente
- (2) Faible
- (3) Moyenne
- (4) Forte
- (5) Très forte

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

4. Saveur sucrée

- (1) Absente
- (2) Faible
- (3) Moyenne
- (4) Forte
- (5) Très forte

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

5. Saveur acide

- (1) Absente
- (2) Faible
- (3) Moyenne
- (4) Forte
- (5) Très forte

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

6. Arrière-goût

- (1) Absente
- (2) Faible
- (3) Moyenne
- (4) Forte
- (5) Très forte

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

7. Texture en bouche

- (1) Très lisse
- (2) Lisse
- (3) Peu granuleuse
- (4) Granuleuse
- (5) Très granuleuse

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

8. Consistance

- (1) Liquide
- (2) Crémeuse

	Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
(3) Onctueuse										
(4) Epaisse										
(5) TROP épaisse										

9. Préférence générale

Attribuez pour chaque échantillon une note de préférence entre 1 à 9, sachant que le numéro 1 correspond à l'échantillon le moins préféré et le numéro 9 à celui le plus préféré selon l'échelle présentée ci-dessous :

1 : Extrêmement désagréable, 6 : Assez agréable,

2 : Très désagréable, 7 : Agréable,

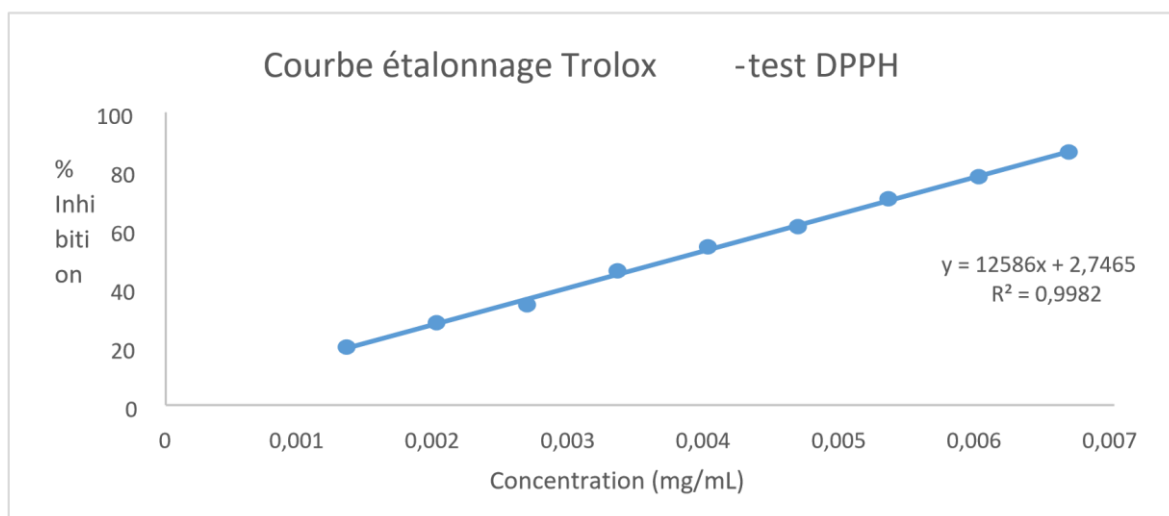
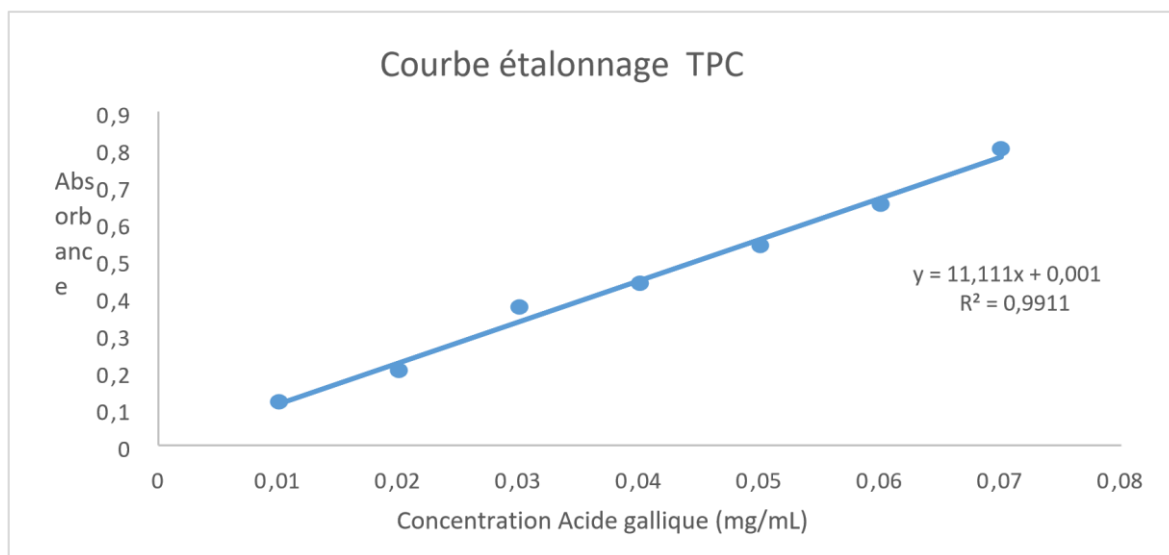
3 : Désagréable, 8 : Très agréable,

4 : Assez désagréable, 9 : Extrêmement agréable 5 : Ni agréable ni désagréable,

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Note									

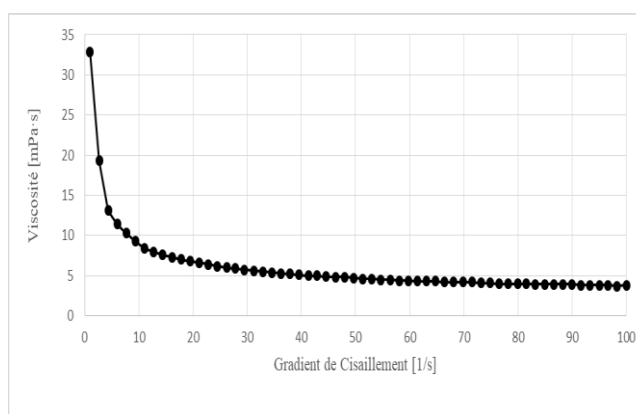
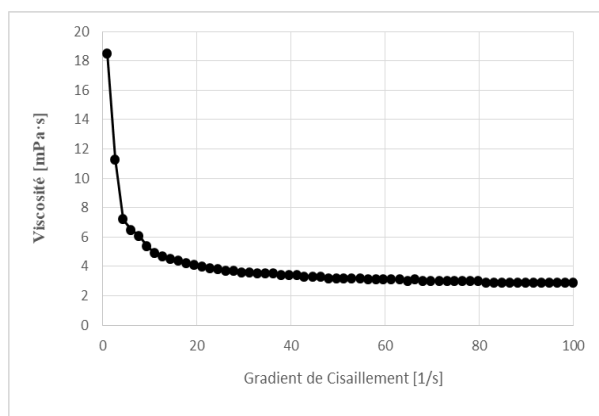
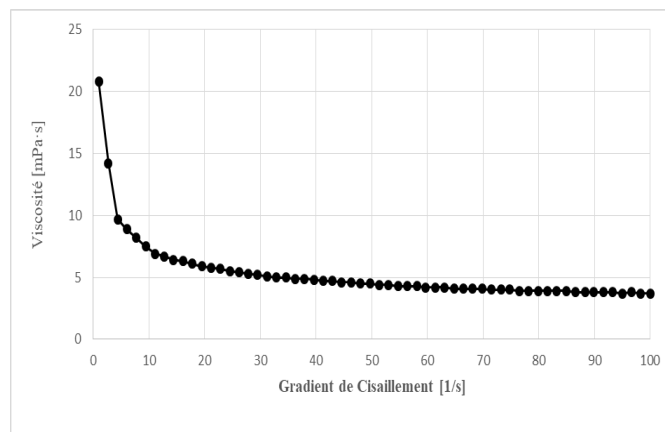
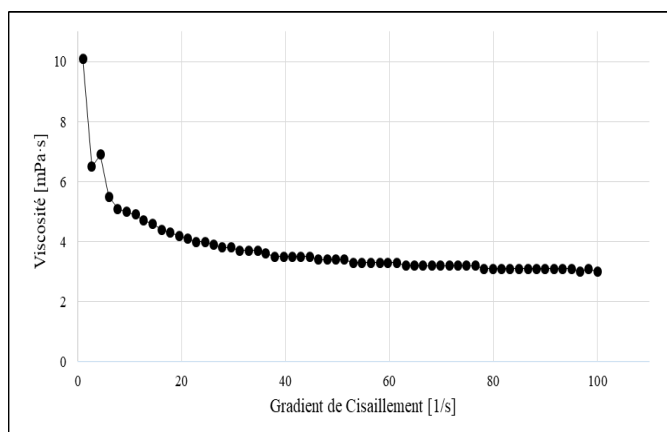
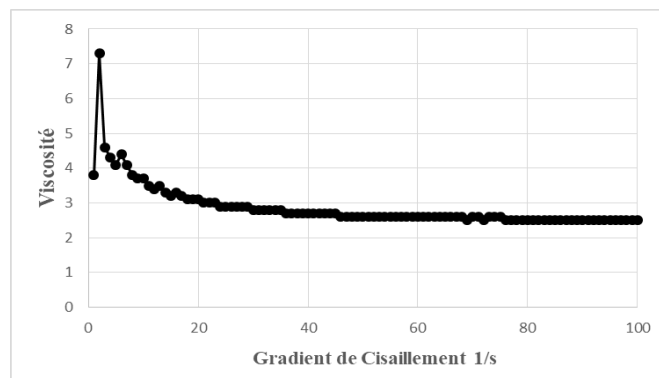
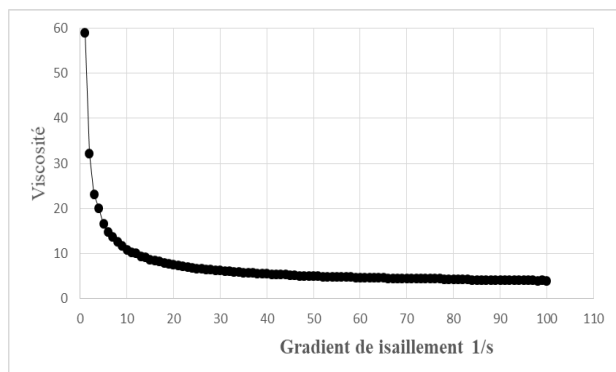
Merci pour votre coopération

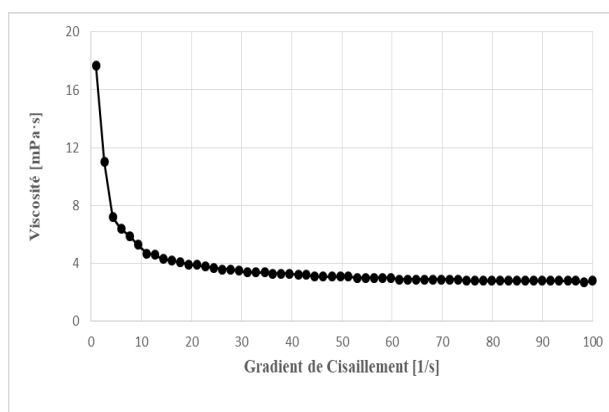
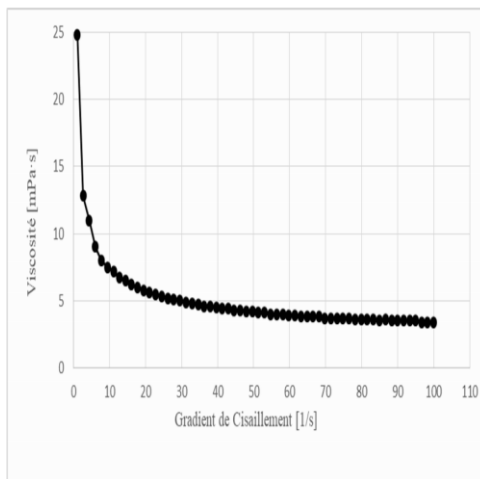
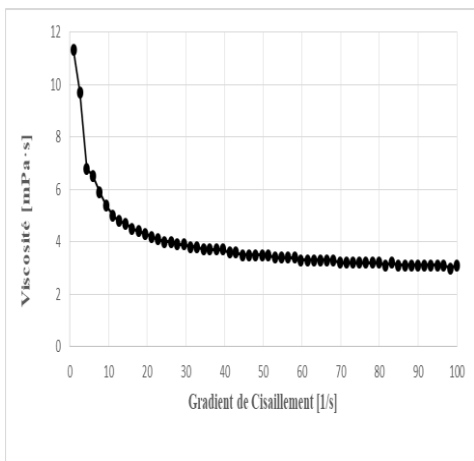
Annexe2



Annexe 3

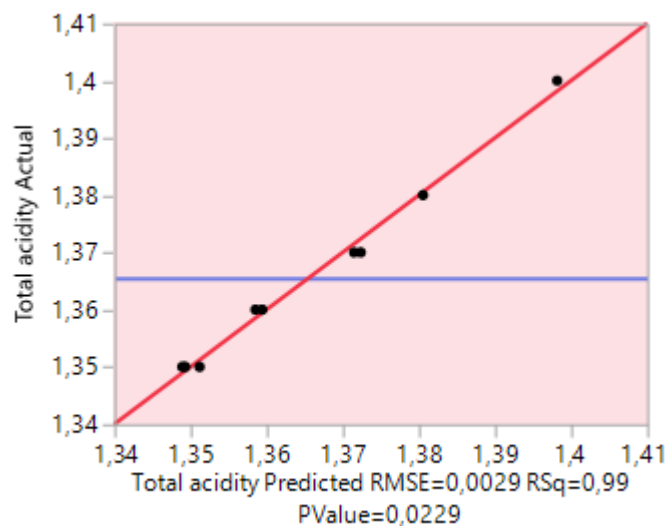
Courbes d'écoulement montrant l'évolution de la viscosité de cisaillement pour boisson végétales



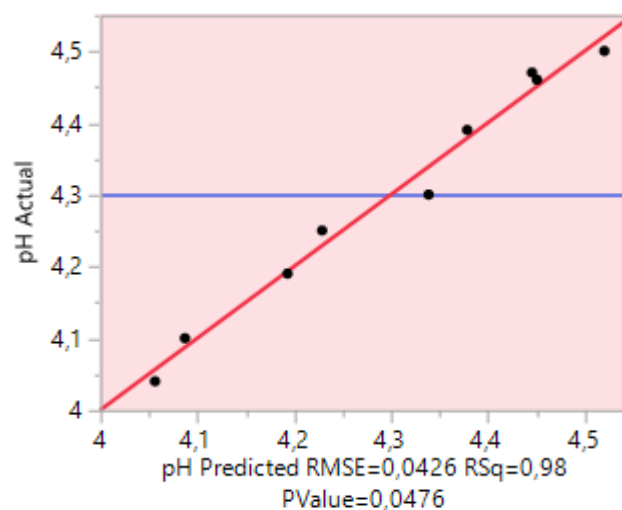


Annexe 4

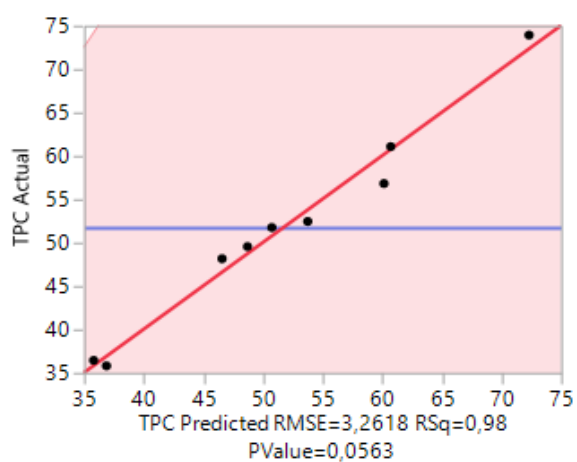
Response Ph



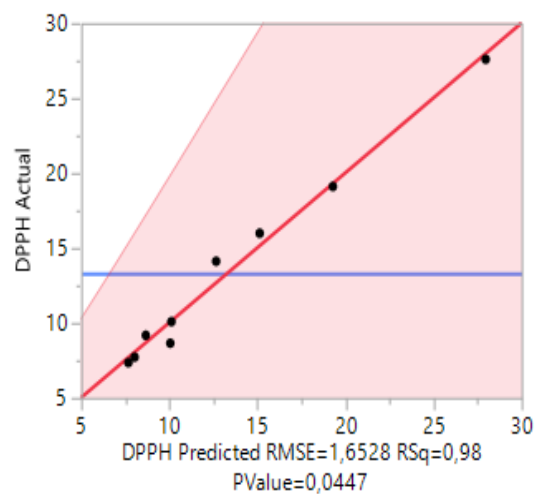
Response Total acidity

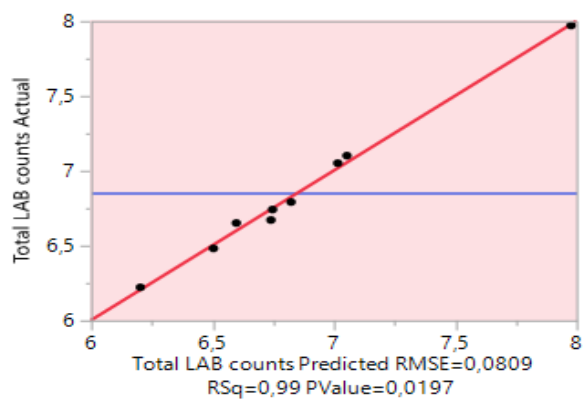
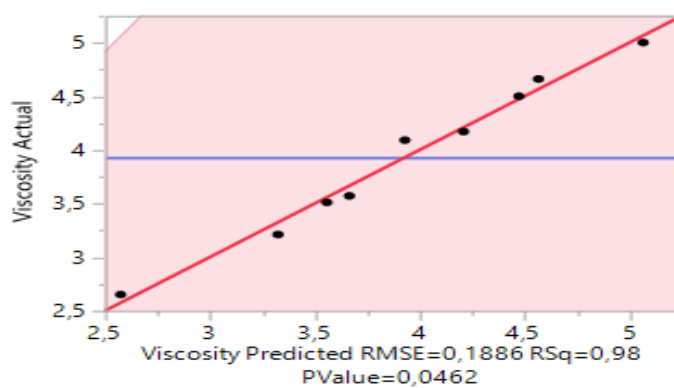
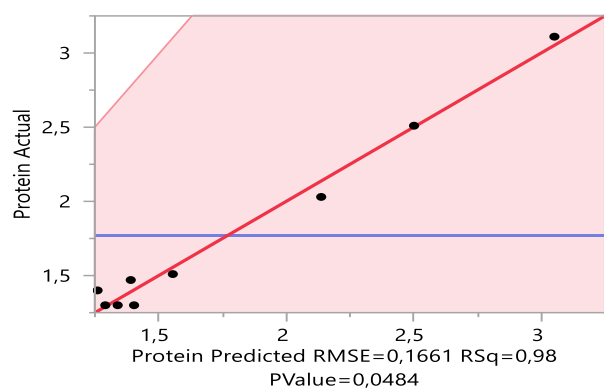


Response TPC



Response DPPH



Response Total LAB counts**Response Viscosity****Response Protein**

Résumé

Dans le cadre du développement d'un produit fonctionnel associant les bénéfices nutritionnels des légumineuses aux effets positifs des bactéries lactiques (BL), cette étude vise à optimiser la formulation de boissons fermentées à base de légumineuses en appliquant un plan d'expériences D-optimal. Des mélanges de trois ingrédients : féverole, pois chiche et betterave, ont été préparés sous forme liquide, puis fermentés à l'aide d'une souche sélectionnée de *Lactobacillus plantarum*. L'effet des proportions de matières premières sur plusieurs réponses, le pH final, l'acidité titrable, les polyphénols totaux, l'activité antioxydante (DPPH), la viscosité, la teneur en protéines et la charge microbienne a été évalué. Le plan D-optimal a permis d'identifier une formulation optimale répondant à la fois aux critères nutritionnels, microbiologiques et organoleptiques.

Mots clés : boisson fermentée, légumineuses, féverole, pois chiche, betterave, fermentation lactique, plan D-optimal.

Abstract

As part of the development of a functional product combining the nutritional benefits of legumes with the positive effects of lactic acid bacteria (LAB), this study aims to optimize the formulation of legume-based fermented beverages by applying a D-optimal experimental design. Mixtures of three ingredients - faba bean, chickpea and beet - were prepared in liquid form, and then fermented using a selected strain of *Lactobacillus plantarum*. The effect of raw material proportions on several responses, final pH, titratable acidity, total polyphenols, antioxidant activity (DPPH), viscosity, protein content and microbial load was evaluated. The D-optimal plan was used to identify an optimal formulation meeting nutritional, microbiological and organoleptic criteria.

Key words: fermented beverage, legumes, faba bean, chickpea, beetroot, lactic fermentation, D-optimal plan.

ملخص

كيفية ترفي إطار تطوير منتج وظيفي يجمع بين الفوائد الغذائية للبقوليات والآثار الإيجابية للبكتيريا اللبنية، تهدف هذه الدراسة إلى تحسين مشروبات مخمرة تعتمد على (الحمص والشمندر، باستخدام تصميم تجريبي، تم تحضير الخلطات في شكل سائل وتخميرها بواسطة (الفافا ، الحموضة المعاكسة، إجمالي البوليفينولات، النشاط (pH) ريباعم دعدل أقفو اهميقت متو ، قراتخم قللاس :القول يئاهنلا ينجورديهلا مقرلا ي البروتين والحمولة الميكروبية من تحديد تركيبة مثلى تستجيب للمعايير الغذائية والميكروبيولوجية ، اللزوجة، (DPPH)المضاد للأكسدة :الكلمات المفتاحية.تيسحلاو .محتو ميمصتلا نك م دقو

تصمي D-optimal، مشروب مخمر، بقوليات، فول، حمص، شمندر، تخمير لبني

