



**HAL**  
open science

**Revue de littérature sur le houblon de la région Serrana,  
Etat de rio de janeiro, Brésil: caractérisation  
physico-chimique d'une bière artisanale enrichie en  
curcuma, poivre noir et cannelle**

Camille Brown

► **To cite this version:**

Camille Brown. Revue de littérature sur le houblon de la région Serrana, Etat de rio de janeiro, Brésil: caractérisation physico-chimique d'une bière artisanale enrichie en curcuma, poivre noir et cannelle. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04917212

**HAL Id: dumas-04917212**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04917212v1>**

Submitted on 28 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



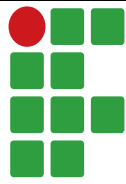
**INSTITUTO FEDERAL RIO DE JANEIRO**  
Rua Senador Furtado, 121, Maracanã. 20270-021  
Rio de Janeiro- RJ  
Tel : +55 (21) 2566 - 7714  
<https://www.ifrj.edu.br>

# **Revue de littérature sur le houblon de la région Serrana, État de Rio de Janeiro, Brésil**

**Caractérisation physico-chimique d'une bière artisanale  
enrichie en curcuma, poivre noir et cannelle**

**Brown Camille**  
Promotion 2021-2024

**MÉMOIRE INGÉNIEUR AGROALIMENTAIRE**  
Octobre 2024



**INSTITUTO  
FEDERAL**  
Rio de Janeiro

Diplôme : Ingénieur Oniris

Agroalimentaire / Biotechnologies de la santé

Parcours personnalisé de l'approfondissement de 3<sup>ème</sup> année :

Auteur/e : Camille BROWN

Structure d'accueil : Instituto Federal Rio de Janeiro

Nombre de pages : 75    Annexes : 16

Adresse : Rua Senador Furtado, 121, Maracanã. 20270-021  
Rio de Janeiro- RJ

Année de soutenance : 2024

**Titre :** Revue de littérature sur le houblon de la région Serrana, État de Rio de Janeiro, Brésil.

**Title :** Caractérisation physico-Chimique d'une bière artisanale enrichie en curcuma, poivre noir et cannelle.

**Résumé :** Cette étude aborde deux objectifs clés dans le domaine des sciences brassicoles. Le premier concerne une analyse comparative des houblons américains et brésiliens afin d'évaluer la faisabilité de substituer les houblons importés par des variétés locales. L'étude examine si les houblons brésiliens peuvent maintenir ou améliorer la qualité organoleptique et la stabilité de la bière, tout en offrant des avantages économiques et environnementaux potentiels. Le second objectif se concentre sur l'incorporation d'épices, curcuma, cannelle et poivre noir, dans des bières artisanales. Cette recherche explore si l'ajout de ces épices améliore la capacité antioxydante, la complexité aromatique et la stabilité oxydative de la bière, tout en étudiant les bénéfices potentiels pour la santé liés à leurs composés bioactifs. Les résultats apportent des perspectives pertinentes sur l'approvisionnement local en houblon et les propriétés fonctionnelles des bières enrichies en épices, avec des implications pour l'industrie brassicole.

**Abstract :** This study addresses two key objectives within brewing science. The first involves a comparative analysis of American and Brazilian hops to assess the viability of substituting imported hops with locally produced varieties. The study evaluates whether Brazilian hops can maintain or improve the organoleptic quality and stability of beer, while offering potential economic and environmental benefits. The second objective focuses on the incorporation of spices—turmeric, cinnamon, and black pepper—into artisanal beer. This research investigates whether the addition of these spices enhances the antioxidant capacity, aromatic complexity, and oxidative stability of the beer, and explores the potential health benefits associated with their bioactive compounds. The findings contribute valuable insights into both the local sourcing of hops and the functional properties of spice-enriched beers, with implications for the brewing industry.

**Mots-Clés :** Houblon, Brésil, Bière, Recherche et développement, Revue, Analyse Physico-Chimique, Composés phénoliques, Composés Phénoliques, Flaveur, Épices.

**Key Words:** Hops, Brazil, Beer, Research and development, Review, Physico-Chemical Analysis, Phenolic compounds, Flavor, Spices.

## ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je soussigné/e (Nom/prénom), .....  
Camille BROWN

déclare être pleinement conscient/e que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de support, y compris sur Internet, constitue une violation des droits d'auteur/e ainsi qu'une fraude caractérisée (articles L.335-2 et L.335-3 du Code de la propriété intellectuelle).

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour la rédaction de mon mémoire de fin d'études, conformément à la Charte anti-plagiat d'Oniris.

Fait à... Autun .....  
le...10/11/2024.....

Signature :





# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont joué un rôle essentiel durant mon stage.

Tout d'abord, mes remerciements les plus sincères vont à Luciana Cardoso Nogueira, ma référente de stage. Votre accompagnement, vos précieux conseils et votre disponibilité ont été inestimables tout au long de cette expérience. J'ai eu la chance de bénéficier de votre expertise et de votre engagement, et cela a été pour moi un apprentissage riche. Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait.

Je souhaite également remercier Renata Raices, une enseignante-chercheuse passionnée. Votre soutien dans l'apprentissage des techniques d'analyse en HPLC et SPME a été déterminant. Merci de m'avoir transmis vos connaissances et de m'avoir guidée avec tant de patience dans les différents projets en cours.

Un merci particulier à Guilherme Santana, pour votre collaboration et votre enthousiasme au laboratoire. J'ai beaucoup appris à vos côtés, et votre professionnalisme a grandement contribué à faire de ce stage une expérience constructive et motivante.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à Giovan Kronenberger, qui m'a donné l'opportunité d'explorer l'univers brassicole en me faisant découvrir des brasseries, notamment AMBEV, une entreprise majeure dans le secteur des boissons. Ces visites ont été enrichissantes et ont approfondi ma compréhension du domaine.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement Eduardo Coelho Cerqueira, pour son aide précieuse dans toutes les démarches administratives. Votre soutien a grandement simplifié ces aspects et permis de rendre cette expérience encore plus agréable.

Merci à chacun d'entre vous pour votre bienveillance, votre soutien et votre engagement. Vous avez tous contribué à faire de ce stage un moment inoubliable et extrêmement formateur.

# Table des matières

## REMERCIEMENTS

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## ABBREVIATION DES SIGLES

<b>1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Présentation du sujet et importance du houblon dans l'industrie brassicole</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Objectifs du mémoire</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Problématiques rencontrées</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Revue de Littérature</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Histoire et importance du houblon dans la fabrication de la bière</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Origines et évolution de l'utilisation du houblon .....	5
2.1.2 Impact sur le goût, la conservation et la popularité de la bière .....	6
<b>2.2 Caractéristiques des houblons étudiés</b> .....	<b>7</b>
2.2.1 Description des variétés de houblon cultivées au Brésil et aux États-Unis .....	7
2.2.2 Composition chimique spécifique à chaque variété .....	8
<b>2.3 Différences régionales dans la composition du houblon</b> .....	<b>10</b>
2.3.1 Facteurs influençant la composition .....	10
2.3.2 Cas spécifique du Brésil : Régions productrices et leurs caractéristiques .....	12
2.3.3 Rôle des acides alpha (humulones) dans l'amertume et la stabilité de la bière .....	14
2.3.4 Importance des acides bêta (lupulones) dans la conservation et l'évolution aromatique ..	14
2.3.5 Propriétés biologiques et organoleptiques des acides alpha et bêta .....	15
<b>2.4 Huiles essentielles dans le houblon</b> .....	<b>15</b>
2.4.1 Principaux composants des huiles essentielles .....	15
2.4.2 Influence des huiles essentielles sur le profil aromatique de la bière .....	17
<b>2.5 Description de la zone d'étude : région de la Serra de Rio de Janeiro</b> .....	<b>18</b>
3.1.1 Caractéristiques géographiques et climatiques de la région .....	19
2.5.1 Raisons du choix de cette zone pour l'étude .....	19
<b>2.6 Procédures de culture et de récolte du houblon Comet au Brésil et aux États-Unis</b>	<b>20</b>
2.6.1 Techniques agricoles : semis, entretien, récolte. ....	20
2.6.2 Comparaison des pratiques de culture entre les deux régions .....	21
2.6.3 Importance de la récolte des cônes matures .....	21
2.6.4 Méthode d'analyse des acides alpha et bêta : HPLC .....	22
2.6.5 Méthodes d'analyse des huiles essentielles et autres composés bioactifs .....	23
<b>3 Méthodologie</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 Fabrication de bière à partir de différents houblons</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2 Description du processus de brassage utilisé pour la bière enrichie en épices</b> ..	<b>24</b>
<b>3.3 Analyse des paramètres physico-chimiques de la bière</b> .....	<b>27</b>
3.3.1 Détermination de l'amertume (Indice d'Amertume de la Bière) .....	27
3.3.2 Détermination de la teneur en alcool et densité .....	28
3.3.3 Mesure du pH.....	29
3.3.4 Mesure de la couleur (EBC).....	29
3.3.5 Détermination des composés phénoliques totaux .....	31
3.3.6 Mesure de la capacité antioxydante .....	32
3.3.7 Normes de qualité pour les styles Belgian Blond Ale et Cream Ale .....	32

<b>3.4</b>	<b>Analyse du profil aromatique du houblon .....</b>	<b>33</b>
3.4.1	Analyse des composés volatils par MEFS-CG-EM .....	33
<b>4</b>	<b>Résultats.....</b>	<b>36</b>
4.1	Résultats des analyses en contrôle de qualité.....	36
4.2	Quantification des phénoliques et de l'activité antioxydante .....	38
4.3	Présentation des résultats des analyses chimiques des échantillons de bières enrichie en épices.....	40
<b>5</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>42</b>
5.1	Interprétation des résultats.....	42
5.1.1	Évaluation de l'influence des épices sur les échantillons .....	42
5.1.2	Évaluation de la substitution du houblon <i>Comet</i> brésilien .....	44
<b>6</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>45</b>
6.1	Objectifs et principaux résultats.....	45
6.2	Perspectives pour de futures recherches .....	46
<b>7</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Annexes .....</b>	<b>52</b>

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

<b>Figure 1</b> : Micro brasserie à l'IFRJ, Campus Rio de Janeiro .....	4
<b>Figure 2</b> : (A) Houblon lors de la récolte ; (B) Les cônes de houblon ; (C) Les glandes de lupulines dans les cônes de houblon (Dandan Yan (2018)). .....	9
<b>Figure 3</b> : Carte géographique de la région Serrana dans l'état de Rio de Janeiro (Rafael Galdo, 2014, Editoria de Arte) .....	19
<b>Figure 4</b> : Diagramme de fabrication des bières avec addition d'épices pour une production de 25L. ....	26
<b>Figure 5</b> : Appareil Alcoyzer utilisé pour le contrôle qualité (Kronenberg, 2024). ....	28
<b>Figure 6</b> : Colorimètre Lovibon, Série 3000 (Kronenberg, 2024). ....	30
<b>Figure 7</b> : Classification (échelle EBC) de couleur de bière (Source : BARROS & GHESTI, 2016). ....	30
<b>Figure 8</b> : Échelle de teinte de l'acide gallique afin de déterminer la courbe d'étalonnage (Kronenbourg, 2024). ....	31
<b>Figure 9</b> : Graphique des corrélations entre les teneurs en CFT et l'AOX des bières analysées .....	40
<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques chimiques des variétés de houblon cultivées dans différentes régions .....	13
<b>Tableau 2</b> : Récapitulatif des composés chimiques et des arômes des huiles essentielles de houblon. ....	17
<b>Tableau 3</b> : Échantillon des bières et concentration des épices ajoutées .....	25
<b>Tableau 4</b> : Normes de qualité pour les styles Belgian Blond Ale et Cream Ale .....	32
<b>Tableau 5</b> : Résultats des analyses physico-chimiques des bières .....	38
<b>Tableau 6</b> : Résultats des analyses des composés phénoliques et de la capacité antioxydante .....	39
<b>Tableau 7</b> : Principaux composés chimiques identifiés dans les différentes épices et échantillons de bières .....	41
<b>Tableau 8</b> : Avantages et inconvénients de la substitution du houblon importé par le houblon local au Brésil. ....	44

# ABBREVIATION DES SIGLES

ABV – Titre alcoométrique volumique (Alcohol By Volume)

AOX – Antioxydants (Antioxidants)

DPPH – 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (méthode pour évaluer l'activité antioxydante)

EBC – Convention européenne de la brasserie (European Brewery Convention)

GC-MS – Chromatographie en phase gazeuse – spectrométrie de masse (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)

HPLC – Chromatographie liquide à haute performance (High-Performance Liquid Chromatography)

IBU – Unité internationale d'amertume (International Bitterness Unit)

IPA – India Pale Ale (type de bière houblonnée)

ISO – Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization, norme de qualité)

MEFS – Micro-extraction en phase liquide (Microextraction in Liquid Phase)

pH – Potentiel hydrogène (mesure d'acidité ou de basicité)

SPME – Micro-extraction en phase solide (Solid Phase Microextraction)

TPH – Polyphénols totaux (Total Polyphenols)

# 1. Introduction

## 1.1 Présentation du sujet et importance du houblon dans l'industrie brassicole

Depuis des millénaires, la bière a occupé une place centrale dans les cultures du monde entier, non seulement comme boisson, mais aussi comme élément fondamental de la société. Les techniques de brassage ont évolué au fil des siècles, intégrant divers ingrédients et méthodes pour perfectionner ce qui est devenu une industrie globale florissante. Parmi les ingrédients essentiels à la fabrication de la bière, le houblon *Humulus lupulus* L. se distingue par son rôle unique dans la définition des propriétés sensorielles de la bière, telles que son amertume, son arôme et sa stabilité. Utilisé pour la première fois au Moyen Âge, le houblon a transformé l'art du brassage, permettant la conservation à long terme de la bière grâce à ses propriétés antimicrobiennes, et enrichissant sa palette aromatique avec des notes florales, épicées, et fruitées (Almaguer et al., 2014).

Aujourd'hui, le houblon est cultivé principalement dans les régions tempérées de l'hémisphère nord, dans des pays comme l'Allemagne, les États-Unis, et la République Tchèque, où des variétés distinctes de houblon sont cultivées pour répondre aux demandes spécifiques des marchés mondiaux. Ces pays ont développé des industries robustes autour de la production du houblon, alimentant à la fois les grandes brasseries industrielles et les microbrasseries artisanales, qui utilisent le houblon pour créer des bières aux profils gustatifs uniques. Le succès de ces industries a inspiré d'autres régions du monde à explorer le potentiel de la culture du houblon localement, cherchant à réduire la dépendance aux importations et à développer des saveurs régionales distinctives (Bamforth, 2016).

Le Brésil, bien que reconnu pour sa production de bière et se classant parmi les plus grands consommateurs de bière au monde, reste largement dépendant des importations de houblon pour répondre à sa demande intérieure. En 2018, 98 % du houblon utilisé par les brasseries brésiliennes provenait de l'étranger, principalement d'Allemagne et des États-Unis (CervBrasil, 2016). Cette dépendance expose le pays aux fluctuations des prix internationaux et aux incertitudes liées à l'approvisionnement. Dans ce contexte, la possibilité de cultiver du houblon localement devient de plus en plus attrayante pour les producteurs et les brasseurs brésiliens,

notamment dans les régions où le climat pourrait favoriser la culture de certaines variétés de houblon.

L'une de ces régions prometteuses est la région Serrana situé dans l'état de Rio de Janeiro, où des conditions climatiques favorables et des initiatives locales ont encouragé l'expérimentation avec la culture du houblon. Parmi les variétés étudiées, le houblon *Comet*, originaire des États-Unis, a montré un potentiel intéressant. Ce houblon est particulièrement apprécié pour ses notes de pamplemousse et de fruits tropicaux, qui le rendent populaire dans la production de bières artisanales, notamment les IPA (India Pale Ales) (Aquino et al., 2019).

## 1.2 Objectifs du mémoire

Ce mémoire vise à évaluer le potentiel de la culture du houblon *Comet* dans la région Serrana à Rio de Janeiro, en se concentrant sur une comparaison des caractéristiques chimiques et sensorielles de cette variété cultivée localement avec celles du houblon *Comet* importé des États-Unis. L'objectif est de déterminer si le houblon local pourrait offrir une alternative viable aux importations, tout en contribuant au développement d'une identité brassicole brésilienne unique. En outre, ce travail explore les défis et les opportunités liés à d'une production de houblon durable et compétitive au Brésil, en tenant compte des particularités climatiques et agronomiques du pays, tout en ouvrant la voie à des recherches futures dans ce domaine.

Enfin, le dernier objectif consiste à contrôler la qualité et d'analyser le profil aromatique d'une bière artisanale enrichie en épices (cannelle, curcuma, poivre noir), en évaluant l'impact de ces ajouts sur l'arôme et les propriétés organoleptiques, tout en mettant en évidence leurs composés aux effets bénéfiques sur la santé.

## 1.3 Problématiques rencontrées

Au cours de ce projet, plusieurs difficultés majeures ont considérablement ralenti, voire empêché, la progression des travaux selon le calendrier initialement prévu. Ces obstacles ont eu un impact direct sur la réalisation des objectifs fixés et ont contraint l'équipe à adopter des solutions alternatives. Les principales problématiques rencontrées sont détaillées ci-dessous :

**Grèves des professeurs :** Les interruptions prolongées dans l'enseignement et l'encadrement, causées par des grèves, ont perturbé le déroulement du projet. Ces grèves ont duré environ les

deux premiers mois de mon stage et ont impacté l'accès aux laboratoires et l'accès aux ressources techniques.

**Retard dans l'approvisionnement :** L'approvisionnement des matières premières, en particulier le houblon *Comet* cultivé au Brésil et aux États Unis a été compromis par des retards logistiques imprévus. Ces difficultés d'acheminement ont eu un impact direct sur le calendrier des tests de production et d'analyse chimique. Nous avons reçu le houblon américain mi-juillet.

**Problèmes techniques liés aux équipements :**

**Chromatographe en phase gazeuse (GC) :** A la réception du dernier houblon, il était prévu de faire les analyse GC en Head Space mais un dysfonctionnement majeur de la carte de communication entre la chromatographie, le spectrophotomètre de masse et le logiciel de l'appareil a empêché l'analyse des composés volatils du houblon. Bien que des démarches aient été entreprises pour contacter un technicien qualifié, l'établissement n'a pas autorisé le financement nécessaire pour les réparations.

**Problèmes techniques sur la microbrasserie :** Les installations de la microbrasserie, où certaines étapes critiques de notre projet de production de bière devaient être réalisées, ont présenté plusieurs défauts techniques importants. Le principal problème concernait l'absence de tuyauterie d'évacuation des vapeurs d'eau lors de la phase de brassage. En l'absence de ce système essentiel, les vapeurs d'eau restaient confinées dans le local, ce qui empêchait le bon déroulement du processus de brassage et rendait la production impossible dans ces conditions. De plus, une fuite au niveau du fermenteur a été observé, rendant également cette étape de fermentation non opérationnelle. En conséquence, il a été impossible de réaliser la production de bière initialement prévue dans ces installations, et nous avons été contraints de rechercher



des solutions alternatives notamment celle d'effectuer la production en collaboration avec une brasserie artisanale afin d'utiliser leurs locaux et matériel.



*Figure 1 : Micro brasserie à l'IFRJ, Campus Rio de Janeiro*

Dans ce cadre, la spécificité de notre projet, à savoir une production à petite échelle, a ajouté une complexité supplémentaire. En effet, les équipements requis pour des volumes de production réduits diffèrent souvent de ceux utilisés dans des brasseries industrielles classiques. Il était donc indispensable de trouver une brasserie partenaire équipée de matériel adapté à notre projet. Après plusieurs tentatives et contacts avec différents brasseurs, nous avons réussi à établir un partenariat avec une brasserie disposée à nous accueillir et dotée des équipements adéquats. Cette brasserie, nommée Cervejaria Doutor Duranz, est située à Petrópolis, à environ une heure de Rio de Janeiro, et fait partie de la Rota Cervejeira RJ. Spécialisée dans la production de bières artisanales, elle propose également un "Clube de Assinatura" pour la livraison de bouteilles de bière et de growlers de chopp. Nous avons établi ce partenariat grâce à notre communication avec l'un des associés de la brasserie, Ricardo Branco, qui s'est montré très réceptif à notre projet. Cependant, après avoir trouvé ce partenaire, un autre obstacle est apparu : la nécessité de suivre un processus administratif pour obtenir les autorisations de production. Au Brésil, ces démarches bureaucratiques peuvent s'avérer longues et complexes car il y a très peu de moyen mis en place pour les projets.

Malheureusement, après avoir finalisé le partenariat entre l'Institut Fédéral de Rio de Janeiro et la microbrasserie et obtenu les autorisations nécessaires pour pouvoir passer trois jours sur le site de production, un imprévu de dernière minute est survenu : notre partenaire brasseur a été confronté à un problème familial qui l'a empêché de nous accueillir pour la production. Ce contretemps a donc entraîné un nouveau retard dans l'avancement du projet, nous obligeant à chercher une nouvelle solution pour poursuivre la production dans des conditions optimales. Finalement, il n'a pas été possible de produire notre bière avec le houblon *Comet*. Nous avons donc redirigé nos efforts vers d'autres objectifs, notamment la rédaction d'une revue sur les houblons brésiliens, ainsi que l'analyse de bière artisanale enrichie en épices. Ce dernier visait à évaluer l'évolution du profil aromatique et les propriétés antioxydantes de la bière en fonction de différentes concentrations d'épices, telles que le curcuma, le poivre noir et la cannelle.

## 2 Revue de Littérature

### 2.1 Histoire et importance du houblon dans la fabrication de la bière

#### 2.1.1 Origines et évolution de l'utilisation du houblon

Depuis des milliers d'années, la bière a été une boisson de prédilection dans de nombreuses cultures à travers le monde, évoluant à partir de simples fermentations de grains vers des recettes plus complexes et raffinées. Les premières traces de brassage remontent à l'Antiquité, mais ce n'est qu'au Moyen Âge que le houblon est devenu un ingrédient clé de la fabrication de la bière. Introduit en Europe au IXe siècle, le houblon a rapidement gagné en popularité pour ses propriétés conservatrices et aromatiques, remplaçant progressivement d'autres herbes qui étaient traditionnellement utilisées pour parfumer la bière, telles que le gruit (Sambrook, 1996).

Le développement du houblon en tant qu'ingrédient essentiel a marqué un tournant dans l'histoire de la bière. En Allemagne, la *Reinheitsgebot*, ou loi de pureté de 1516, a solidifié le rôle du houblon en stipulant que la bière devait être composée uniquement d'eau, d'orge et de houblon, garantissant ainsi la qualité et la conservation des bières. Ce cadre légal a non seulement contribué à la standardisation de la bière, mais il a aussi promu l'expansion des cultures de houblon dans les régions européennes les mieux adaptées, notamment en Allemagne, en Tchéquie et en Angleterre (Meussdoerffer, 2009).

L'utilisation du houblon s'est ensuite propagée aux quatre coins du monde avec l'essor des explorations et du commerce international, accompagnant la diffusion des méthodes de

brassage européennes. Aux États-Unis, par exemple, le houblon est devenu un pilier de l'industrie brassicole au XIXe siècle, avec des régions comme la Yakima Valley devenant des centres mondiaux de production de houblon. Ce développement global a été motivé non seulement par la demande croissante de bière, mais aussi par l'amélioration des techniques agricoles et des variétés de houblon, qui ont permis une production plus efficace et des rendements accrus (Almaguer et al., 2014).

Au Brésil, bien que la consommation de bière soit parmi les plus élevées au monde, la production de houblon est restée limitée pendant longtemps. Ce n'est qu'au début du XXIe siècle que des initiatives locales ont commencé à émerger pour développer la culture du houblon dans certaines régions du pays, motivées par le désir de réduire la dépendance aux importations et de créer des bières avec une identité locale unique. Le développement de la production de houblon au Brésil, bien que récent, montre un potentiel prometteur, notamment dans les régions aux climats favorables comme la Serra da Mantiqueira et la région Serrana de Rio de Janeiro (Aquino et al., 2019).

### 2.1.2 Impact sur le goût, la conservation et la popularité de la bière

Le rôle du houblon dans la bière ne se limite pas à ses propriétés conservatrices. Ses composés chimiques, notamment les acides alpha et beta, ainsi que les huiles essentielles, ont un impact direct sur le profil gustatif et aromatique de la bière. Les acides alpha, une fois isomérisés lors de l'ébullition, confèrent à la bière son amertume caractéristique, qui équilibre la douceur des malts et définit de nombreux styles de bière, comme les IPA qui sont devenues immensément populaires ces dernières décennies (Verstrepen et al., 2003).

Les huiles essentielles du houblon, telles que le myrcène, le caryophyllène et le farnésène, contribuent aux arômes complexes que l'on trouve dans les bières, allant des notes florales et fruitées aux tons épicés et boisés. Ces caractéristiques sont particulièrement valorisées dans les bières artisanales, où la diversité des profils aromatiques est un critère de qualité. L'utilisation du houblon en fin de fermentation, dans un processus appelé dry hopping, permet d'extraire un maximum d'arômes sans ajouter d'amertume supplémentaire, augmentant ainsi la popularité des bières houblonnées (Bamforth, 2016).

Au-delà du goût, le houblon joue un rôle crucial dans la conservation de la bière. Ses propriétés antimicrobiennes empêchent la prolifération de bactéries indésirables, prolongeant ainsi la durée de conservation de la bière sans avoir recours à des conservateurs artificiels. Cette

fonction conservatrice a été un facteur clé dans la popularité historique du houblon, notamment pour les bières qui devaient être transportées sur de longues distances, comme les India Pale Ales destinées aux colonies britanniques en Inde (Hornsey, 2003).

Ainsi, l'importance du houblon dans la fabrication de la bière ne peut être sous-estimée. Non seulement il a transformé le goût et la conservation de la bière, mais il a aussi contribué à l'essor de la popularité de la bière à travers le monde. Aujourd'hui, avec l'expansion de la culture du houblon dans de nouvelles régions, y compris au Brésil, il reste à voir comment ces développements influenceront l'industrie brassicole à l'échelle locale.

## 2.2 Caractéristiques des houblons étudiés

### 2.2.1 Description des variétés de houblon cultivées au Brésil et aux États-Unis

Le houblon *Comet*, développé dans les années 1960 par le Département de l'Agriculture des États-Unis, est principalement utilisé pour ses propriétés amères mais offre également un profil aromatique distinct, avec des notes d'agrumes, de pamplemousse et des touches herbacées et résineuses. Aux États-Unis, il est cultivé dans des régions telles que l'État de Washington, l'Oregon et l'Idaho, des zones réputées pour offrir des conditions optimales au houblon. Ces régions bénéficient de sols argileux bien drainés et de longues heures d'ensoleillement, éléments essentiels au bon développement de la plante (Durello et al., 2019).

En revanche, au Brésil, la culture du *Comet* est plus récente et rencontre des défis différents. En 2021, le pays a importé environ 4,7 mille tonnes de houblon, pour un coût total dépassant les 450 millions de réais, ce qui montre une forte dépendance envers les importations (Embrapa, 2023). Toutefois, la culture du houblon a commencé à se développer dans plusieurs régions du pays, dans les États de Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo et Rio Grande do Norte, où des initiatives locales cherchent à réduire cette dépendance et à répondre à la demande croissante des brasseries artisanales locales (Durello et al., 2019). En effet, le Brésil a vu une augmentation rapide du nombre de microbrasseries, passant de 893 en 2018 à plus de 1 200 en 2022, une croissance qui intensifie la demande pour des matières premières locales de qualité (Embrapa, 2023).

Contrairement aux climats tempérés des États-Unis, les régions tropicales et subtropicales brésiliennes, caractérisées par des périodes d'ensoleillement plus courtes et des niveaux

d'humidité plus élevés, influencent la composition chimique du houblon, notamment la concentration en huiles essentielles et en polyphénols (Guimarães et al., 2021). Grâce à ces conditions particulières, les cultures de *Comet* au Brésil permettent parfois jusqu'à deux ou trois récoltes par an, contrairement aux États-Unis où une seule récolte est possible (Durello et al., 2019).

Les premières analyses des cultures brésiliennes de *Comet* révèlent que, bien que le rendement en acides alpha soit légèrement inférieur à celui des variétés américaines, la richesse en huiles essentielles, comme le myrcène et l'humulène, confère au *Comet* brésilien un profil aromatique unique. Ce dernier est marqué par des arômes plus floraux et herbacés, influencés par le terroir tropical (Durello et al., 2019 ; Guimarães et al., 2021). De plus, les microbrasseries locales utilisent souvent du houblon frais non pelletisé, ce qui leur permet de bénéficier d'une meilleure qualité aromatique par rapport aux houblons importés, qui subissent un processus de pelletisation et de conservation thermique pour prolonger leur durée de vie, mais au détriment de leur fraîcheur. Les houblons importés, généralement vendus en paquets de 400 grammes, peuvent atteindre des prix de 300 réais, ce qui constitue un coût important pour les microbrasseries (Embrapa, 2023). Cette situation rend la culture de houblon au Brésil une alternative économiquement viable. En plus de réduire les dépenses, les brasseries locales tirent parti de la fraîcheur et de la qualité du houblon cultivé sur place pour produire des bières aux arômes plus subtils et complexes.

### 2.2.2 Composition chimique spécifique à chaque variété

La composition chimique du houblon varie en fonction de la variété, des conditions de culture et du climat local. Les fleurs féminines du houblon, grâce à leurs glandes de lupuline, contiennent des résines et des huiles essentielles, des composants essentiels dans le processus de brassage, jouant un rôle crucial dans l'amertume, l'arôme et les propriétés antioxydantes de la bière (Durello et al., 2019).

Les acides alpha, présents dans les résines du houblon, sont responsables de l'amertume de la bière. Ces acides varient entre 5 % et 21 % du poids sec, avec des niveaux pour le *Comet* américain oscillant entre 9 % et 11 %, tandis que les variétés brésiliennes présentent des niveaux légèrement inférieurs, environ 8 % à 10 % (Guimarães et al., 2021). Au Brésil, les initiatives telles que Rede Lúpulo visent à accroître l'efficacité des cultures locales tout en réduisant la dépendance vis-à-vis des importations (Embrapa, 2023). En 2021, la production brésilienne de

houblon couvrait environ 50 hectares répartis dans plusieurs régions à microclimats distincts, bien que le potentiel de croissance soit encore important (Jastrombek et al., 2022).

Les huiles essentielles, représentant entre 0,5 % et 3 % du poids des fleurs de houblon, sont primordiales pour le profil aromatique des bières. Le myrcène, l'humulène et le caryophyllène, parmi d'autres composés, confèrent des arômes allant des agrumes aux notes herbacées et résineuses (Durello et al., 2019). En raison des conditions tropicales brésiliennes, les huiles essentielles du *Comet* cultivé localement apportent des arômes plus floraux et herbacés par rapport aux variétés américaines.

En outre, les polyphénols, dont la concentration dans le houblon peut atteindre environ 4 % en poids sec, offrent des propriétés antioxydantes significatives. Ces composés protègent la bière contre l'oxydation, améliorant sa stabilité et préservant ses caractéristiques sensorielles (Bogusz Junior et al., 2023).

Par ailleurs, la production de houblon au Brésil est encore à ses débuts, bien que des progrès significatifs aient été réalisés avec des techniques de traitement avancées comme l'extraction au CO<sub>2</sub> supercritique. Ces méthodes permettent de produire des extraits de houblon de haute qualité tout en réduisant l'empreinte environnementale du processus, fournissant ainsi une alternative viable aux produits importés coûteux (Carvalho Pinto et al., 2023).



**Figure 2 :** (A) Houblon lors de la récolte ; (B) Les cônes de houblon ; (C) Les glandes de lupulines dans les cônes de houblon (Dandan Yan (2018)).



## 2.3 Différences régionales dans la composition du houblon

### 2.3.1 Facteurs influençant la composition

La composition chimique du houblon est largement influencée par trois principaux facteurs : le climat, le type de sol et les pratiques agricoles. Chacun de ces éléments joue un rôle fondamental dans la qualité du houblon, affectant les niveaux d'acides alpha et bêta, ainsi que les huiles essentielles responsables de l'arôme. Ces facteurs varient d'une région à l'autre, ce qui explique les différences observées dans les caractéristiques du houblon cultivé à travers le monde.

**Climat** : Le climat est un facteur majeur qui affecte la croissance et la composition chimique du houblon. Dans les régions tempérées, comme le nord des États-Unis ou certaines parties de l'Europe, les températures modérées variant entre 16 °C et 27 °C et des longues périodes d'ensoleillement entre 15 à 16 heures par jour pendant la période de croissance permettent une production optimale d'acides alpha et d'huiles essentielles (Durello et al., 2019). À l'inverse, dans des régions plus tropicales ou subtropicales comme le Brésil, les températures plus élevées allant de 20 °C à 35 °C et les périodes d'ensoleillement plus courtes, environ 12 heures par jour, peuvent réduire la concentration en acides alpha, tout en modifiant le profil aromatique des huiles essentielles. La variabilité des précipitations, qui oscille entre 1 500 et 2 000 mm par an dans certaines régions du sud-est du Brésil, affecte également la croissance des plants de houblon. Des périodes de sécheresse prolongées ou d'humidité excessive peuvent avoir un impact négatif sur la production de résines et d'huiles essentielles (Embrapa, 2023).

**Sol** : Le type de sol est également essentiel pour la qualité du houblon. Les sols bien drainés, riches en matière organique et légèrement acides (pH entre 6,0 et 7,5) favorisent la production de résines et d'huiles essentielles. Aux États-Unis, par exemple, les sols alluviaux de la vallée de Yakima sont réputés pour produire des houblons avec des niveaux élevés d'acides alpha. En revanche, dans des régions comme le Brésil, les sols peuvent être plus acides ou compacts, nécessitant des pratiques agricoles spécifiques pour assurer une croissance optimale des plants (Embrapa, 2023).

**Pratiques agricoles** : Les pratiques agricoles, y compris la gestion de l'irrigation, la fertilisation, et le contrôle des maladies, ont un impact direct sur la qualité chimique du houblon. Des études montrent que les techniques d'irrigation peuvent influencer les rendements en acides alpha, avec une irrigation excessive pouvant diluer les composés résineux du houblon (Carvalho Pinto et al., 2023). Par exemple, dans les régions à climat tropical, l'irrigation goutte

à goutte a été adoptée pour optimiser la quantité d'eau fournie aux plants, réduisant ainsi le stress hydrique et améliorant la qualité des résines produites.

Les efforts pour introduire des pratiques durables, telles que l'utilisation de bioinsumos (biofertilisants), se multiplient également. Les bioinsumos permettent de stimuler la production de composés bénéfiques tout en limitant l'usage de produits chimiques. Selon l'étude réalisée par l'Embrapa en 2023, l'introduction de biofertilisants adaptés aux conditions tropicales a permis d'améliorer de 10 % à 15 % les rendements en acides alpha dans certaines régions du sud du Brésil, tout en renforçant la résistance des plants aux maladies et au stress thermique et hydrique.

Des recherches sur la production de houblon dans des climats subtropicaux, comme en Floride, montrent que la manipulation de la photopériode peut améliorer la production en permettant deux cycles de récolte par an. En utilisant des LED pour prolonger les heures de lumière, il est possible de retarder la floraison et d'améliorer la croissance végétative. Les résultats ont montré une augmentation du rendement jusqu'à 92 % entre la première et la deuxième année, avec des rendements atteignant jusqu'à 465 kg/ha lors de la saison de printemps de la deuxième année (Acosta-Rangel et al., 2024).

**Impact du moment de la récolte :** En termes de récolte, le timing est également crucial pour la concentration des huiles essentielles. Une récolte précoce peut empêcher l'accumulation optimale des résines et huiles essentielles, entraînant un profil aromatique incomplet. Les recherches montrent que les niveaux de myrcène, responsable des arômes herbacés et citronnés, peuvent être réduits de 10 % à 20 % lorsque le houblon est récolté avant sa pleine maturité (Durello et al., 2019).

À l'inverse, une récolte tardive peut entraîner une dégradation des huiles essentielles, notamment le myrcène, qui est très volatil et sensible à l'exposition prolongée au soleil et à la chaleur. Cela peut également entraîner une concentration plus élevée d'humulène, modifiant ainsi le profil aromatique du houblon et rendant la bière plus épicée et moins fruitée (Guimarães et al., 2021). Une étude a montré que le houblon *Cascade* cultivé dans ces conditions subtropicales présente des variations importantes dans les acides alpha (de 2,7 % à 6,2 %) et les huiles essentielles (de 0,14 mL à 0,53 mL/100 g) en fonction du moment de la récolte (Acosta-Rangel et al., 2024).



Au Brésil, en raison des conditions climatiques variables, la récolte doit souvent être adaptée pour éviter les périodes de pluie prolongées ou de chaleur intense, qui peuvent altérer la qualité des huiles essentielles. Les producteurs utilisent des pratiques telles que l'irrigation contrôlée et l'utilisation de filets d'ombrage pour gérer la maturation des plantes et récolter au moment optimal. Cela permet d'obtenir des niveaux de myrcène variant entre 30 % et 45 % des huiles essentielles totales dans les variétés locales (Embrapa, 2023).

### 2.3.2 Cas spécifique du Brésil : Régions productrices et leurs caractéristiques

La culture du houblon au Brésil est encore relativement nouvelle, mais elle connaît une croissance rapide. Plusieurs régions, chacune ayant des conditions environnementales uniques, influencent la composition chimique des variétés de houblon cultivées. Voici un aperçu des principales régions productrices de houblon au Brésil et des facteurs spécifiques qui affectent la qualité du houblon dans chaque zone.

**Rio Grande do Sul** : Cet État du sud du Brésil est l'un des principaux producteurs de houblon, bénéficiant d'un climat tempéré avec des températures allant de 15 °C à 20 °C et une pluviométrie annuelle d'environ 1 500 mm. Les sols riches et bien drainés de la région permettent une culture productive, avec des variétés comme *Cascade* et *Comet* montrant des niveaux d'acides alpha entre 8 % et 12 %, ainsi qu'une excellente qualité aromatique (Embrapa, 2023).

**Santa Catarina** : Bénéficiant d'un climat subtropical humide, cet État connaît des précipitations abondantes (plus de 2 000 mm par an), ce qui peut être un défi pour la culture du houblon en raison des risques de maladies fongiques. Cependant, des pratiques agricoles innovantes, comme l'utilisation de biofertilisants, ont permis d'améliorer les rendements tout en maintenant une haute qualité des acides alpha (Embrapa, 2023).

**Minas Gerais** : Bien que moins réputé que les États du sud, Minas Gerais est une région en croissance pour la production de houblon, en particulier dans ses zones montagneuses où les conditions sont plus propices (températures allant de 16 °C à 25 °C). Les variétés cultivées, comme le *Hallertau Blanc*, montrent des niveaux d'acides alpha intéressants, bien que l'irrigation et la gestion des sols demeurent des défis importants (Guimarães et al., 2021).

**Rio de Janeiro et São Paulo :** Ces deux États cultivent du houblon dans des zones montagneuses où les températures sont plus modérées. Les pluviométries annuelles varient entre 1 200 mm et 1 800 mm, et les sols nécessitent souvent des amendements pour améliorer la rétention d'eau et garantir un bon développement des racines. Les variétés locales, telles que *Comet* et *Cascade*, montrent des résultats prometteurs, mais la gestion des excès d'humidité reste cruciale pour assurer une production de qualité (Durello et al., 2019).

**Comparaison avec la culture en Italie :** La culture du houblon en Italie, dans des conditions subalpines tempérées, présente à la fois des similitudes et des différences avec celle du Brésil. Les variétés italiennes, comme *Magnum* et *Marynka*, produisent des rendements en huiles essentielles élevés, avec 29,42 L/ha et 16,24 L/ha respectivement, grâce à des conditions climatiques stables et prévisibles (Mongelli et al., 2016). Au Brésil, en revanche, les producteurs doivent ajuster les cycles de culture pour éviter les impacts des pluies et sécheresses prolongées, rendant la gestion plus complexe (Guimarães et al., 2021).

Les sols italiens, souvent calcaires et bien drainés, favorisent la concentration en acides alpha, tandis que les sols acides des régions de Santa Catarina et Rio Grande do Sul nécessitent des amendements réguliers (Embrapa, 2023). Bien que les deux régions utilisent des pratiques agricoles innovantes comme l'irrigation contrôlée et les bioinsumos, la stabilité climatique de l'Italie facilite la prévisibilité des récoltes, contrairement au Brésil, où des techniques comme la manipulation de la photopériode sont essentielles pour optimiser les rendements (Acosta-Rangel et al., 2024).

**Tableau 1:** Caractéristiques chimiques des variétés de houblon cultivées dans différentes régions

Caractéristiques	<i>Comet</i> USA	<i>Simcoe</i> USA	<i>Comet</i> Brésil	<i>Cascade</i> Brésil	<i>Vitoria</i> Brésil	<i>Canastra</i> Brésil	<i>Magnum</i> Italie	<i>Marynka</i> Italie	<i>Nelson Sauvin</i> Nouvelle- Zélande
<b>Acides alpha (%)</b>	9-11	12-14	8-10	2.7-6.2	5-7	6-9	12-14	7-10	12-15
<b>Acides bêta (%)</b>	4-6	3.5-4.5	3-5	1.9-3.2	3.5-5.5	5-6	5-6	4-6	4-6
<b>Myrcène (mg/kg)</b>	400-600	550-750	350-550	350-550	300-450	400-600	400-550	350-500	300-500
<b>Humulène (mg/kg)</b>	100-200	120-240	120-180	200-300	150-250	200-300	180-250	150-220	150-250

<b>Caryophyllène (mg/kg)</b>	50- 100	50-100	60-90	60-80	50-70	60-90	50-80	60-100	40-90
<b>Polyphénols (%)</b>	3-4	5-7	2.5- 3.5	4-6	4-5	5-7	3.5-4.5	3.5-4.5	4-6
<b>Huiles essentielles (%)</b>	0.5-3	0.5-1.0	0.6- 2.5	0.14- 0.53	0.7-3	1-3	29.42 L/ha  2.94	16.24 L/ha  1.62	0.5-1.5

### 2.3.3 Rôle des acides alpha dans l'amertume et la stabilité de la bière

Les acides alpha, ou humulones, sont les principaux contributeurs à l'amertume de la bière. Lors du brassage, ils se transforment en iso-humulones, qui sont plus solubles et stables, donnant à la bière une amertume durable (Olsovska et al., 2016). Ils interagissent avec les huiles essentielles et les polyphénols, influençant le profil aromatique. Les houblons riches en acides alpha, comme le *Magnum*, offrent une amertume marquée, tandis que les variétés à faible teneur, comme certaines brésiliennes, produisent des saveurs plus subtiles (Durello et al., 2019). Outre leur rôle dans l'amertume, les acides alpha stabilisent la bière en empêchant l'oxydation et la prolifération bactérienne, augmentant ainsi sa durée de conservation (Frag & Wessjohann, 2012). Ils contribuent également à maintenir une amertume stable même après plusieurs mois de stockage, ce qui est essentiel pour les bières exportées ou vieilles.

### 2.3.4 Importance des acides bêta dans la conservation et l'évolution aromatique

Contrairement aux acides alpha, les acides bêta, ou lupulones, n'affectent pas directement l'amertume pendant le brassage mais influencent la qualité sensorielle à long terme. Lors du vieillissement, les acides bêta deviennent solubles et génèrent une amertume subtile qui évolue avec le temps, ajoutant de la complexité aux bières vieilles (Olsovska et al., 2016). Les bêta-acides sont également des conservateurs naturels, retardant l'oxydation et offrant une protection contre les bactéries Gram-positives (Frag & Wessjohann, 2012). Cette capacité à prolonger la durée de vie des bières tout en préservant leur profil aromatique les rend particulièrement précieux dans les bières artisanales vieilles. Les acides bêta dans le houblon, comme dans le *Cascade*, contribuent à une amertume retardée, tandis que les acides alpha fournissent une amertume immédiate. Ainsi, un houblon riche en acides bêta crée un équilibre : l'amertume se ressent rapidement, suivie d'une amertume plus complexe qui se développe progressivement, enrichissant la saveur de la bière.

### 2.3.5 Propriétés biologiques et organoleptiques des acides alpha et bêta

Les acides alpha et bêta possèdent des propriétés anti-inflammatoires, antioxydantes et antibactériennes. Les iso-humulones, dérivés des acides alpha, ont montré des effets anti-inflammatoires, pouvant être bénéfiques pour la prévention de maladies chroniques comme l'arthrite ou les maladies cardiovasculaires (Farag & Wessjohann, 2012). De plus, leurs propriétés antioxydantes aident à protéger les cellules contre les dommages oxydatifs, tout en préservant la qualité sensorielle de la bière en évitant l'oxydation des composés aromatiques. Les acides bêta, quant à eux, montrent des capacités antimicrobiennes, inhibant la prolifération de micro-organismes nuisibles, particulièrement dans les bières non pasteurisées (Carvalho Pinto et al., 2024).

D'un point de vue organoleptique, les acides alpha contribuent à l'amertume immédiate, tandis que les bêta-acides influencent les arômes qui évoluent avec le vieillissement, apportant des notes herbacées, terreuses et épicées (Olsovska et al., 2016). L'équilibre entre ces deux types d'acides permet de créer des bières complexes et équilibrées, particulièrement appréciées dans les bières artisanales et de garde.

## 2.4 Huiles essentielles dans le houblon

Les huiles essentielles sont des composants volatils majeurs du houblon et jouent un rôle crucial dans la définition du profil aromatique et de l'amertume de la bière. Bien que leur concentration soit généralement inférieure à 1 % du poids total du houblon, ces composés sont responsables des caractéristiques aromatiques distinctes que l'on retrouve dans différentes variétés de bière. Leur composition varie considérablement en fonction des conditions de culture, des méthodes de traitement et des variétés de houblon.

### 2.4.1 Principaux composants des huiles essentielles

Les huiles essentielles du houblon sont principalement composées de trois types de composés : les hydrocarbures (terpènes), les hydrocarbures oxygénés (alcools, esters) et les composés de soufre.

**Hydrocarbures (terpènes) :** Les hydrocarbures représentent généralement la plus grande proportion des huiles essentielles, avec des composants tels que le myrcène, l'humulène et le caryophyllène. Le myrcène est l'un des hydrocarbures les plus abondants dans certaines variétés de houblon comme le *Cascade* ou le *Comet*, apportant des arômes herbacés et citronnés

à la bière (Mongelli et al., 2016). L'humulène, en revanche, est associé à des notes épicées et boisées, tandis que le caryophyllène ajoute des arômes terreux et poivrés (Durello et al., 2019).

**Hydrocarbures oxygénés** : Les alcools, esters et aldéhydes formés dans les huiles essentielles contribuent également aux arômes complexes du houblon. Les alcools tels que le linalol et le géraniol apportent des notes florales, tandis que les esters comme le farnésol créent des arômes fruités (Olsovska et al., 2016). Ces composés sont particulièrement volatils et jouent un rôle important dans l'arôme perçu immédiatement après l'ouverture d'une bouteille de bière.

**Composés de soufre** : Bien que présents en plus petites quantités, les composés de soufre tels que les thiols ont un impact significatif sur l'arôme de la bière. Ces composés peuvent ajouter des notes très variées, allant du fruit tropical à l'oignon, en fonction de leur concentration. Cependant, lorsque ces composés sont présents en excès ou en déséquilibre, ils peuvent également contribuer à des off-flavors indésirables, comme des notes d'oignon, d'ail ou de chou. Ces off-flavors peuvent nuire à la qualité globale de la bière, rendant l'équilibre des arômes essentiel pour une expérience de dégustation agréable. Dans l'étude de Guimarães et al., 2021, les composés de soufre, tels que les thiols, présents dans des houblons comme le *Simcoe* ou le *Nelson Sauvin* ont plutôt conféré des arômes fruités, tels que ceux de la mangue et du fruit de la passion, soulignant ainsi l'importance de l'équilibre des arômes pour garantir une expérience de dégustation agréable.

Ces trois familles de composés travaillent ensemble pour définir le caractère aromatique du houblon et de la bière. Les proportions de chaque composant dépendent fortement de la variété de houblon utilisée, ainsi que des conditions climatiques et des pratiques agricoles. Les études sur les houblons cultivés au Brésil montrent que, bien que la concentration en myrcène puisse être légèrement inférieure à celle observée dans des houblons cultivés en Europe, les huiles essentielles brésiliennes conservent un profil aromatique intense, avec des notes herbacées et florales marquées (Embrapa, 2023).

**Tableau 2** : Récapitulatif des composés chimiques et des arômes des huiles essentielles de houblon

<b>Famille de composés</b>	<b>Composés principaux</b>	<b>Arômes associés</b>	<b>Exemples de houblons</b>	<b>Volatilité</b>
<b>Hydrocarbures terpéniques</b>	Myrcène, Humulène, Caryophyllène	Herbacés, citronnés, épicés, boisés, terreux, poivrés	Cascade, Comet	Oui
<b>Hydrocarbures oxygénés</b>	Alcools (Linalol, Géranol), Esters (Farnésol)	Floraux, fruités	Divers houblons	Oui
<b>Composés de soufre</b>	Thiols	Fruits tropicaux, oignon	Simcoe, Nelson Sauvin	Oui (dans certains cas)

#### 2.4.2 Influence des huiles essentielles sur le profil aromatique de la bière

Les propriétés volatiles des huiles essentielles varient en fonction des conditions de culture, des pratiques de brassage, ainsi que des interactions avec d'autres composants comme les levures. L'influence de ces huiles est particulièrement prononcée dans les bières modernes, où l'accent est mis sur des profils aromatiques complexes, notamment dans les IPA ou les bières houblonnées à cru.

**Effet du « dry hopping »** : L'une des méthodes les plus populaires pour maximiser l'impact des huiles essentielles sur le profil aromatique est le dry hopping. Contrairement à l'ajout de houblon pendant l'ébullition, cette technique consiste à ajouter du houblon à froid, pendant la fermentation, ce qui permet de préserver les composants aromatiques les plus volatils, tels que les terpènes et les alcools (Olsovska et al., 2016). En conséquence, les arômes fruités, floraux et herbacés des huiles essentielles sont mieux conservés, ce qui confère aux bières une intensité aromatique supérieure (Guimarães et al., 2021).

Par exemple, le *Simcoe* et le *Nelson Sauvin* sont deux variétés fréquemment utilisées dans le dry hopping pour leurs arômes distinctifs de fruits tropicaux, qui résultent principalement de la présence de thiols et d'autres composés aromatiques volatils (Mongelli et al., 2016).

**Interactions entre huiles essentielles et levures :** Un autre aspect souvent sous-estimé de l'influence des huiles essentielles sur l'arôme de la bière réside dans leur interaction avec les levures. Pendant la fermentation, certaines huiles essentielles, comme le géraniol présent dans le *Cascade*, peuvent être métabolisées par les levures pour produire des arômes secondaires. Par exemple, le géraniol peut être transformé en citronellol, un composé qui confère des notes citronnées et herbacées (Olsovska et al., 2016). Cette transformation contribue à la complexité aromatique de la bière, en créant des couches d'arômes qui évoluent au fil du temps.

**Influence des conditions de culture :** Les conditions de culture du houblon, telles que le climat et le sol, jouent un rôle crucial dans la composition des huiles essentielles et donc dans le profil aromatique de la bière. Les houblons cultivés dans des climats plus chauds, comme au Brésil, sont généralement riches en myrcène, ce qui favorise des arômes plus fruités et herbacés (Embrapa, 2023). En revanche, dans les régions plus tempérées, comme en Europe centrale, des composés comme l'humulène et le caryophyllène dominent, apportant des notes épicées et boisées (Guimarães et al., 2021).

## 2.5 Description de la zone d'étude : région de la Serra de Rio de Janeiro

La région de la Serra de Rio de Janeiro, également appelée Serra Fluminense, est une chaîne de montagnes situées au nord de la capitale de l'État de Rio de Janeiro. Cette région s'étend sur plusieurs municipalités, dont les plus connues sont Petrópolis, Nova Friburgo et Teresópolis. Elle est reconnue pour son climat plus frais par rapport au reste de l'État, grâce à son altitude qui varie entre 500 et plus de 2 200 mètres, avec des sommets tels que le Pico Maior de Friburgo. Historiquement, cette zone a joué un rôle central dans le développement économique de l'État, en étant un point de passage pour l'or extrait des mines de Minas Gerais au XVIII<sup>e</sup> siècle, et plus tard en devenant un centre de la culture du café et d'autres productions.

Sur le plan économique, la région est devenue un centre d'activité touristique, avec un accent sur l'écotourisme et le patrimoine historique (Geografia do Rio de Janeiro, 2021). On y trouve de nombreux musées, des maisons d'hôtes, ainsi que des attractions liées à l'histoire impériale brésilienne, notamment à Petrópolis, où se trouve le musée impérial. La Serra Fluminense est également connue pour son rôle dans l'agriculture, particulièrement dans la culture de produits horticoles et dans l'émergence de l'agriculture biologique à partir des années 1980 (Horta M, 2020).

## REGIÃO SERRANA

### MUNICÍPIOS



*Figure 3 : Carte géographique de la région Serrana dans l'état de Rio de Janeiro (Rafael Galdo, 2014, Editoria de Arte)*

### 3.1.1 Caractéristiques géographiques et climatiques de la région

Le climat de la Serra Fluminense est subtropical montagnard humide, avec des étés chauds et des hivers doux. Cependant, en raison de l'altitude, la région présente des températures plus basses que le reste de l'État, notamment dans les villes de Teresópolis et Nova Friburgo, où les températures hivernales peuvent descendre en dessous de 10°C. Ces zones enregistrent des précipitations annuelles importantes, supérieures à 2 000 mm, avec une saison des pluies qui s'étend de décembre à mars. Ce climat est favorable à la culture du houblon, qui prospère dans des conditions tempérées et humides.

Les sols de la région sont majoritairement acides et bien drainés, des caractéristiques importantes pour la culture du houblon. Ils sont souvent constitués de roches cristallines qui se sont formées il y a des millions d'années, notamment du granite et du gneiss, ce qui leur confère une bonne capacité à retenir les nutriments essentiels pour l'agriculture. La richesse géologique de la Serra Fluminense, combinée à son altitude et à son climat, en fait une zone privilégiée pour l'agriculture spécialisée, comme la production de houblon (Aun, 2018 ; Castelhana, 2021).

### 2.5.1 Raisons du choix de cette zone pour l'étude

Le choix de la région Serrana do Rio de Janeiro comme région d'étude pour la culture du houblon se justifie par plusieurs raisons. Premièrement, son climat subtropical et ses



précipitations abondantes offrent des conditions idéales pour la culture de plantes comme le houblon, qui nécessite à la fois un climat frais et une humidité élevée pour prospérer. De plus, l'altitude de la région permet de reproduire des conditions similaires à celles des grandes régions productrices de houblon dans le monde, notamment les vallées tempérées de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

Deuxièmement, la région dispose déjà d'une infrastructure agricole et touristique développée, avec un réseau croissant de microbrasseries, ce qui en fait un terrain fertile pour des projets expérimentaux de culture du houblon. Le développement du marché de la bière artisanale au Brésil a ouvert des perspectives économiques intéressantes, et la Serra Fluminense, avec ses conditions naturelles, est en passe de devenir un centre de production locale de houblon.

Enfin, le soutien des institutions agricoles locales, telles que l'Embrapa, qui investissent dans la recherche pour l'adaptation du houblon aux conditions climatiques tropicales du Brésil, renforce la pertinence de cette région pour l'étude et le développement de cette culture.

## 2.6 Procédures de culture et de récolte du houblon *Comet* au Brésil et aux États-Unis

La culture du houblon *Comet* repose sur un cycle agricole rigoureux, intégrant des pratiques qui varient selon les régions. Les pratiques appliquées au Brésil diffèrent de celles des États-Unis en raison des variations climatiques et des pratiques agricoles adaptées à chaque région.

### 2.6.1 Techniques agricoles : semis, entretien, récolte.

Au **Brésil**, la culture du houblon *Comet*, introduite relativement récemment, repose sur des techniques adaptées aux conditions climatiques tropicales. Le semis se fait généralement par des rhizomes dans des champs équipés de systèmes d'irrigation goutte-à-goutte pour maintenir une humidité optimale sans saturer les racines. Cette technique est cruciale pour prévenir les maladies fongiques, qui sont plus fréquentes dans les climats humides (Embrapa, 2019). Les pratiques d'entretien se concentrent sur la gestion des maladies et la fertilisation adaptée pour maintenir la qualité des cônes. La période de récolte des cônes de houblon *Comet* au Brésil se situe généralement entre 120 et 140 jours après le semis, un moment déterminant pour maximiser la teneur en huiles essentielles et en résines.

Aux **États-Unis**, le *Comet* est cultivé principalement dans des États comme Washington et l'Oregon, où les conditions climatiques sont plus tempérées. Les pratiques agricoles y sont souvent mécanisées dans les grandes exploitations. Les systèmes d'irrigation y sont moins intensifs grâce à une pluviométrie modérée. Les fermiers américains privilégient également la taille rigoureuse des plants pour garantir une bonne exposition au soleil et une répartition homogène des cônes sur la plante. Le processus de récolte est hautement mécanisé, et les cônes sont cueillis lorsque leur teneur en résines, acides alpha et bêta, atteint son maximum (Odara & Horta, 2020).

### 2.6.2 Comparaison des pratiques de culture entre les deux régions

La principale différence entre les pratiques agricoles au Brésil et aux États-Unis réside dans l'adaptation des techniques aux conditions climatiques. Au Brésil, en raison du climat tropical humide, les producteurs doivent intensifier l'irrigation en période sèche et gérer l'excès d'humidité pendant la saison des pluies. Des systèmes d'irrigation goutte à goutte sont souvent utilisés pour fournir une quantité d'eau précise, limitant ainsi les risques de maladies fongiques et optimisant la croissance des cônes (Embrapa, 2019). Les pratiques de lutte contre les maladies sont également plus intensives au Brésil, en raison de l'humidité constante qui favorise l'apparition de champignons et d'autres agents pathogènes.

L'usage de la mécanisation dans l'entretien des plants et la récolte est plus développé aux États-Unis, ce qui permet une production à plus grande échelle avec moins de main-d'œuvre. En termes d'entretien, les producteurs américains privilégient la taille régulière des plants pour contrôler la hauteur des houblons et améliorer la circulation de l'air, tandis qu'au Brésil, cette pratique est moins courante en raison des spécificités du climat et de la structure des exploitations agricoles (Castelhana, 2021).

### 2.6.3 Importance de la récolte des cônes matures

La récolte des cônes de houblon au bon moment est cruciale pour garantir une teneur optimale en acides alpha et bêta, ainsi qu'en huiles essentielles. Leur concentration atteint son apogée lorsque les cônes sont pleinement matures.

Au Brésil, la récolte des cônes de houblon *Comet* intervient généralement entre 120 et 140 jours après la plantation, lorsque les cônes sont fermes au toucher et commencent à libérer une résine jaune. Cette résine est un indicateur clé que les acides alpha et bêta, ainsi que les huiles

essentielles ont atteint leur concentration maximale (Aun, 2018). Aux États-Unis, les critères de récolte sont similaires, mais la récolte est souvent mécanisée, permettant une récolte plus rapide et plus efficace, garantissant que les cônes sont cueillis au pic de leur maturité pour préserver leurs propriétés chimiques.

#### 2.6.4 Méthode d'analyse des acides alpha et bêta : HPLC

La chromatographie liquide à haute performance (HPLC) est une technique analytique essentielle pour la séparation, l'identification et la quantification des composés dans des mélanges complexes. Elle fonctionne grâce à l'interaction entre une phase mobile liquide, qui traverse une colonne sous haute pression, et une phase stationnaire composée de particules solides, généralement de la silice modifiée. Cette interaction différenciée des composants de l'échantillon avec la phase stationnaire permet leur séparation en fonction de leurs propriétés chimiques.

La HPLC est couramment employée pour l'analyse des acides alpha et bêta dans les extraits de houblon. Cette méthode permet de séparer précisément les différents isomères des acides humulones et lupulones grâce à des colonnes de phase inverse, souvent en utilisant des solvants à base d'eau et d'acétonitrile. Les temps de rétention distincts des acides alpha et bêta facilitent leur quantification précise. Selon des études, comme celle menée par Olsovská et al. (2016), cette approche permet de distinguer les différences structurales entre les isomères des acides du houblon.

Le processus HPLC débute par l'injection d'une petite quantité d'échantillon dans le système. L'échantillon traverse ensuite la colonne sous pression, où les composés sont séparés en fonction de leurs interactions avec la phase stationnaire. Un détecteur, tel qu'un détecteur UV ou fluorimétrique, mesure les composés séparés en fonction de leur temps de rétention. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'analyse rapide et précise des acides organiques présents dans le houblon, contribuant ainsi à l'étude des composés volatils dans l'industrie brassicole.

Dans l'étude de Canbas et al. (2001), intitulée "Analysis of alpha and beta acids in hops by HPLC", la HPLC est utilisée pour quantifier rapidement et précisément les acides alpha et bêta dans divers types de houblon. Grâce à l'utilisation d'une colonne de silice greffée en phase inverse et d'un détecteur UV, cette méthode a permis une analyse détaillée des acides responsables de l'amertume, essentiels dans la conservation et la qualité de la bière.

### 2.6.5 Méthodes d'analyse des huiles essentielles et autres composés bioactifs

L'analyse des huiles essentielles dans le houblon fait appel à des techniques avancées de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) et à la micro-extraction en phase solide (SPME), comme l'illustre l'étude de Gilmare et al. (2008). La SPME est particulièrement adaptée pour l'extraction des composés volatils, tels que les terpènes et les esters, directement à partir des cônes de houblon. Cette technique, qui est rapide et efficace, réduit la dégradation des composés sensibles comme le myrcène et le linalol, offrant une analyse plus précise du profil aromatique.

Les huiles essentielles, riches en terpènes et en sesquiterpènes, sont responsables des arômes distincts du houblon. Des études comparatives, telles que celles menées sur les houblons cultivés en Italie et au Brésil, montrent des différences notables dans la concentration de composés comme le myrcène, l'humulène et le caryophyllène (Carvalho Pinto et al., 2023). La chromatographie en phase gazeuse permet également de détecter des composés soufrés, qui bien que présents en très faibles quantités, ont un impact significatif sur le profil aromatique global de la bière.

Les méthodes d'analyse par HS-SPME ont également été utilisées pour distinguer les variétés de houblon et évaluer leur contribution aromatique dans des bières comme les Pilsner brésiliennes (Carvalho et al., 2022). Ces techniques permettent d'explorer le profil volatil complexe du houblon, en séparant les alcools, esters, composés phénoliques et autres composants volatils. Les études indiquent que des composés tels que le vinylguaiacol et le nonalactone jouent un rôle clé dans la différenciation des bières fermentées avec différents types de houblons.

## 3 Méthodologie

### 3.1 Fabrication de bière à partir de différents houblons

Le houblon Comet avait été sélectionné pour produire une bière de style Cream Ale, qui est une bière légère et douce. Cette expérimentation avait pour but de comparer les caractéristiques des bières élaborées avec le houblon *Comet* cultivé au Brésil et celui importé des États-Unis, afin de déterminer la possibilité de substituer le houblon importé par le houblon local. Le choix de la Cream Ale, une bière blonde légère souvent peu amère, permettait de mettre en avant les

arômes du houblon. La recette qui aurait dû être suivie avait été fournie par la microbrasserie partenaire à Petrópolis, qui utilise exclusivement du houblon *Comet* cultivé dans la région Serrana. Dans le cadre de cette étude, la même recette devait être réalisée avec du houblon *Comet* brésilien ainsi qu'avec son équivalent américain, afin de comparer les deux variétés. Cependant, en raison des contraintes évoquées dans la section 1.3, cette production de bière n'a finalement pas pu être réalisée.

### 3.2 Description du processus de brassage utilisé pour la bière enrichie en épices

Dans la suite de ce rapport, nous aborderons donc le style Belgian Blond Ale, une bière de fermentation haute caractérisée par un profil harmonieux, mariant douceur maltée et amertume légère. Cette bière se distingue par sa robe dorée claire et sa mousse légère et crémeuse. Avec un taux d'alcool compris entre 6 et 7,5 % vol., une amertume modérée de 15 à 30 IBU, et une forte carbonatation de 2,5 à 3 volumes de CO<sub>2</sub>, elle offre une texture effervescente. Le brassage utilise principalement du malt *Pilsen* et parfois du sucre raffiné, avec un houblonnage de variétés comme le *Fuggle* ou le *Saaz*. Les esters et phénols issus de la levure belge (telle que l'*Abbaye*) confèrent à cette bière des arômes fruités et épicés distinctifs, tandis que la fermentation s'effectue à des températures comprises entre 18°C et 22°C.

Quatre échantillons de bières de style Belgian Blond Ale ont été produites à l'échelle de laboratoire en utilisant un équipement de type brassage en cuve unique de l'anglais « single vessel », conçu pour une production de 25 litres. Les malts ont été achetés sous forme moulue la veille de la production.

Les matières premières suivantes ont été utilisées :

- Malt Pilsen – 6,5 kg
- Avoine – 1 kg
- Malt Melanoidin – 500 g
- Sucre raffiné – 500 g
- Houblon Fuggle – 1 paquet de 50 g
- Levure Abbaye (lyophilisée) – 1 paquet de 11 g

Cette recette a été simulée à l'aide du logiciel BeerSmith (voir Annexe 13), qui a prévu les résultats suivants : un taux d'alcool de 7,0 %, une couleur de 11,3 EBC et une amertume

comprise entre 14,7 (IBU), ce qui est donc très proche du style décrit dans le BJCP (BJCP, 2021). Les épices ont été ajoutées en trois concentrations différentes comme présenté dans le Tableau 3. Tous les ingrédients ont été achetés dans le commerce local de la ville de Petrópolis, État de Rio de Janeiro, Brésil, en soulignant que le curcuma a été acquis sous forme de poudre, la cannelle en bâtons et le poivre en grains (voir Annexe 12).

**Tableau 3** : Échantillon des bières et concentration des épices ajoutées

<b>Échantillon de bières</b>	<b>Curcuma (g/L)</b>	<b>Cannelle (g/L)</b>	<b>Poivre noir (g/L)</b>
<b>Contrôle</b>	0	0	0
<b>A</b>	0,5	0,5	0
<b>B</b>	1	1	0
<b>C</b>	2	2	2

Lors du processus de brassage, 6,5 kg de malt Pilsen, 500 g de malt Melanoidin et 1 kg de flocons d'avoine ont été mélangés avec 20 litres d'eau filtrée et déchlorée à 50°C pendant 10 minutes, puis chauffés à 64°C pendant 50 minutes. À la fin de la cuisson, la température a été portée à 78°C pendant 10 minutes (étape de *mash out*) afin d'assurer l'inactivation des enzymes.

La filtration a été réalisée en soulevant le fond filtrant, retenant le grain, suivie d'un lavage avec 23 litres d'eau préalablement chauffée à 78°C. Ensuite, le moût a été porté à ébullition à environ 100°C, ce processus ayant duré un total de 60 minutes. Il convient de noter qu'une partie du houblon (30 grammes) a été ajoutée au début de l'ébullition, tandis que les autres ingrédients (20 grammes de houblon, 500 g de sucre et les épices) ont été ajoutés 10 minutes avant la fin de l'ébullition.

Après l'étape de *whirlpool*, qui a permis la décantation et l'élimination du dépôt, le moût a été refroidi à environ 22°C et transféré dans des bonbonnes en plastique. La levure Abbaye (11 g par emballage) a été ajoutée pour initier la fermentation. Les bonbonnes, équipées de couvercles hermétiques et de dispositifs de type air-lock, ont été conservées dans une chambre froide à une température contrôlée de 18°C jusqu'à la fin de la fermentation, qui a duré 5 jours.

La maturation a ensuite eu lieu dans la même chambre froide, à une température contrôlée de 0°C pendant 10 jours. À la fin de la maturation, les bières ont été conditionnées dans de petits fûts en acier inoxydable et carbonatées de manière forcée avec du dioxyde de carbone.

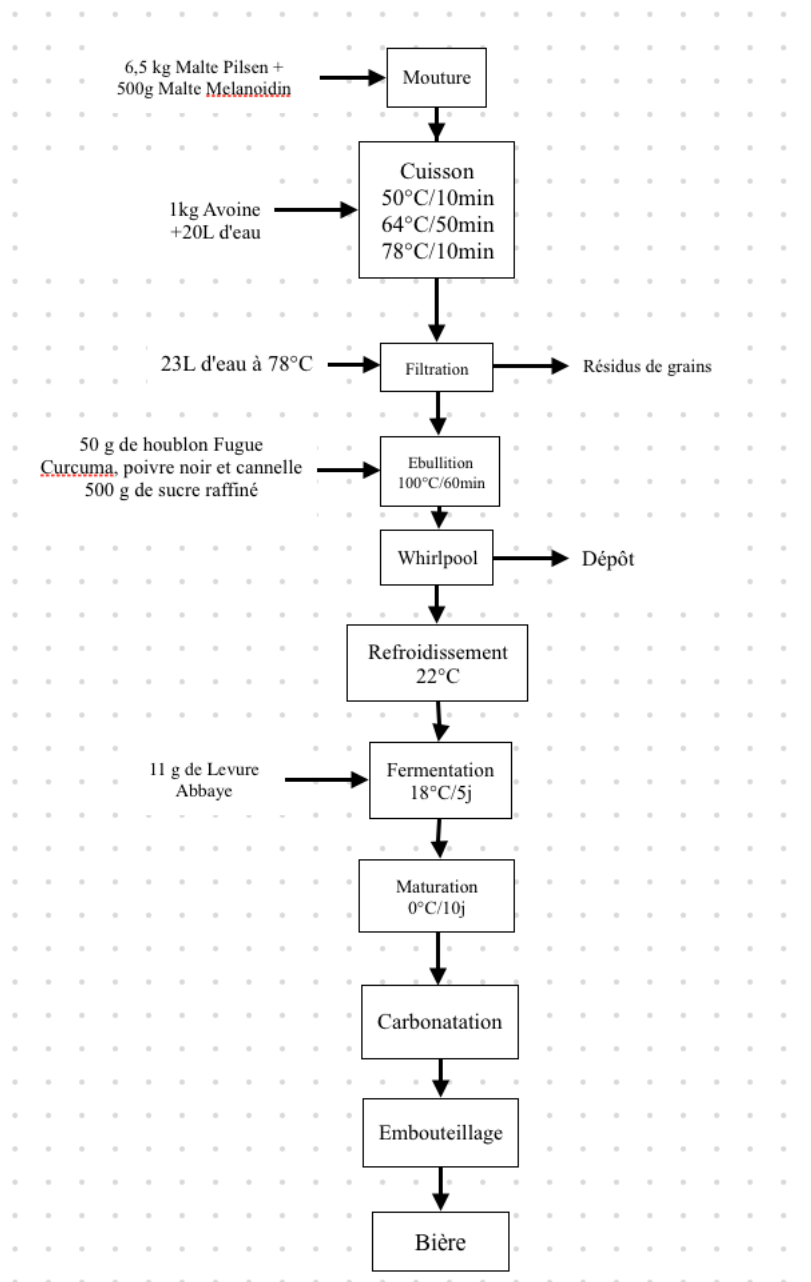


Figure 4: Diagramme de fabrication des bières avec addition d'épices pour une production de 25L.

### 3.3 Analyse des paramètres physico-chimiques de la bière

Le contrôle qualité de la bière est essentiel pour garantir un produit final conforme aux attentes des consommateurs et aux normes de l'industrie. Il implique une série d'analyses physico-chimiques qui évaluent divers paramètres, tels que l'amertume, la couleur, l'arôme et la composition chimique.

#### 3.3.1 Détermination de l'amertume (Indice d'Amertume de la Bière)

**Objectif :** Quantifier l'amertume de la bière en mesurant la concentration en acides iso-alpha.

**Méthode utilisée :** Spectrophotométrie UV-visible, méthode recommandée par la Convention Européenne des Brasseries (EBC 9.8).

**Matériel :**

- Spectrophotomètre UV-visible (Biospectro, modèle SP-220)
- Erlenmeyer de 125 mL
- 3 billes de verre
- 0,5 mL de HCl 6N
- 20 mL d'isooctane
- Cuvette en quartz de 10 mm

**Protocole :**

1. Désaérer 10 mL d'échantillon de bière.
2. Transférer l'échantillon désaéré dans un erlenmeyer de 125 mL.
3. Ajouter 3 billes de verre, 0,5 mL de HCl 6N et 20 mL d'isooctane.
4. Agiter l'erlenmeyer à 125,5 rpm pendant 20 minutes.
5. Laisser reposer l'erlenmeyer pendant 10 minutes pour permettre la séparation des phases.
6. Prélever le surnageant (phase isooctane) et mesurer son absorbance à 275 nm dans une cuvette en quartz à l'aide du spectrophotomètre.
7. Calculer l'indice d'amertume (IBU) en utilisant la formule :  
**Amertume (IBU) = Abs 275 nm \* 50.**



### 3.3.2 Détermination de la teneur en alcool et densité

**Objectif :** Mesurer la teneur en alcool de la bière à partir de la densité avant et après fermentation.

**Matériel :**

- Analyseur Anton Paar (DMA 4500)
- Échantillon de bière désaéré à 20°C

**Protocole :**

1. Climatiser l'échantillon de bière à 20°C.
2. Désaérer l'échantillon pour éliminer le CO<sub>2</sub> résiduel.
3. Introduire l'échantillon dans l'analyseur Anton Paar.
4. Mesurer la densité du moût avant et après fermentation à l'aide du DMA 4500.
5. La teneur en alcool est calculée automatiquement par l'appareil à partir de la différence de densité.



*Figure 5 : Appareil Alcoalyzer utilisé pour le contrôle qualité (Kronenberg, 2024).*

### 3.3.3 Mesure du pH

**Objectif :** Mesurer le pH de la bière pour évaluer son acidité, sa stabilité et son impact sur le goût.

**Matériel :**

- pH-mètre (Incoterm, modèle PHB-550)
- Échantillon de bière désaéré à 20°C

**Protocole :**

1. Désaérer l'échantillon de bière et le climatiser à 20°C.
2. Étalonner le pH-mètre avec des solutions tampons standards (pH 4,0 et 7,0).
3. Immerger l'électrode dans l'échantillon.
4. Lire et enregistrer la valeur du pH.

### 3.3.4 Mesure de la couleur (EBC)

**Objectif :**  
Mesurer la couleur de la bière à l'aide d'un colorimètre Lovibond Série 3000 selon les standards visuels Lovibond.

**Matériel :**

- Colorimètre Lovibond, Série 3000
- Disques standards Lovibond
- Récipient à échantillon
- Échantillons de bière

**Procédure :**

#### 1. Préparation :

- Vérifier que le colorimètre est propre et calibré.
- Nettoyer et sécher le récipient à échantillon.

## 2. Mesure :

- Verser 10 ml de bière dans le récipient.
- Insérer le récipient dans le colorimètre.
- Tourner les disques standards jusqu'à obtenir la correspondance visuelle avec l'échantillon.
- Lire et noter la valeur obtenue sur l'échelle.

## 3. Nettoyage :

- Rincer le récipient à l'eau distillée après chaque mesure.
- Répéter la mesure trois fois pour chaque échantillon.



Figure 6 : Colorimètre Lovibon, Série 3000 (Kronenberg, 2024).

EBC	4-6	4-8	10-12	12-18	20-28	33-36	37-43	43-59	59-69	69	79
COR	Palha	amarelo	Ouro	Ambar profundo, cobre	cobre	Cobre escuro	marrom	marrom escuro	marrom muito escuro	negro	Negro (opaco)

Figure 7 : Classification (échelle EBC) de couleur de bière (Source : BARROS & GHESTI, 2016).

### 3.3.5 Détermination des composés phénoliques totaux

**Objectif :** Quantifier les composés phénoliques totaux dans la bière, indicateur de la qualité antioxydante et de la stabilité du produit.

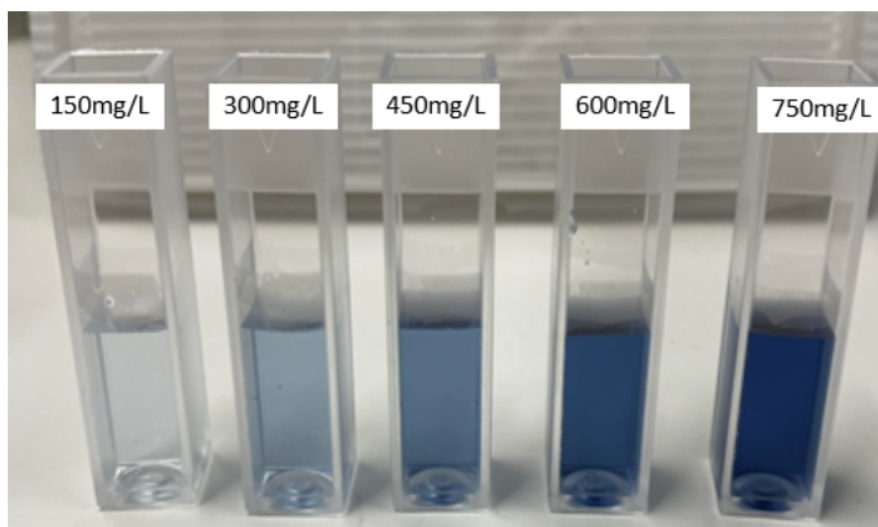
**Méthode utilisée :** Réactif de Folin-Ciocalteu et spectrophotométrie à 760 nm.

**Matériel :**

- Spectrophotomètre UV-visible (Biospectro, modèle SP-220)
- Réactif de Folin-Ciocalteu
- Carbonate de sodium (7,5 % v/v)
- Solution étalon d'acide gallique

**Protocole :**

1. Prélever 0,5 mL d'échantillon de bière et diluer dans 25 mL d'eau distillée.
2. Ajouter 2,5 mL du réactif de Folin-Ciocalteu.
3. Après 2 minutes, ajouter 2 mL de carbonate de sodium (7,5 % v/v).
4. Homogénéiser la solution et chauffer à 50°C pendant 15 minutes.
5. Après 1 heure, mesurer l'absorbance de la solution à 760 nm.
6. Exprimer les résultats en mg EAG/L (équivalent d'acide gallique par litre), sur la base d'une courbe d'étalonnage avec l'acide gallique.



**Figure 8 :** Échelle de teinte de l'acide gallique afin de déterminer la courbe d'étalonnage (Kronenbourg, 2024).

### 3.3.6 Mesure de la capacité antioxydante

**Objectif :** Déterminer l'activité antioxydante de la bière en fonction de sa capacité à réduire le radical stable DPPH.

**Matériel :**

- Spectrophotomètre UV-visible (Biospectro, modèle SP-220)
- DPPH (1,1-diphényl-2-picrylhydrazyle)
- Méthanol

**Protocole :**

1. Préparer une solution de DPPH (10,0 mmol/L).
2. Mélanger 25  $\mu$ L d'échantillon de bière dilué avec 900  $\mu$ L de méthanol et 5  $\mu$ L de solution de DPPH.
3. Incuber la solution dans l'obscurité pendant 30 minutes à 25°C.
4. Mesurer la réduction du DPPH en lisant l'absorbance à 517 nm.
5. Calculer l'activité antioxydante en fonction du pourcentage d'inhibition du DPPH.

### 3.3.7 Normes de qualité pour les styles Belgian Blond Ale et Cream Ale

**Tableau 4 :** Normes de qualité pour les styles Belgian Blond Ale et Cream Ale

<b>Paramètre</b>	<b>Belgian Blond Ale</b>	<b>Cream Ale</b>
<b>Amertume (IBU)</b>	15 à 30 IBU	15 à 20 IBU
<b>Couleur (SRM/EBC)</b>	4 à 7 SRM / 8 à 14 EBC	2 à 5 SRM / 4 à 10 EBC
<b>Teneur en alcool (ABV)</b>	6,0 % à 7,5 % ABV	4,2 à 5,6 % ABV
<b>pH</b>	4,0 à 4,4	4,0 à 4,4
<b>Densité initiale (OG)</b>	1.062 à 1.075	1.042 à 1.055
<b>Densité finale (FG)</b>	1.008 à 1.018	1.006 à 1.012
<b>Composés phénoliques</b>	Modérée	Faible
<b>Capacité antioxydante</b>	Modérée	Faible à modérée

Ce tableau permet de comparer rapidement les différentes normes de ces deux styles de bières, avec une Belgian Blond Ale généralement plus alcoolisée et amère que la Cream Ale, mais les deux partageant une palette de couleur relativement claire et des valeurs similaires pour le pH.

### 3.4 Analyse du profil aromatique du houblon

Comme développé précédemment, le houblon joue un rôle central dans le brassage de la bière, en fournissant les acides alpha et bêta responsables de l'amertume, ainsi que les huiles essentielles qui contribuent à son profil aromatique.

L'analyse chimique du houblon se concentre donc sur la quantification des acides alpha et bêta, ainsi que sur l'identification des huiles essentielles. La Micro-extraction en Phase Solide couplée à la Chromatographie en Phase Gazeuse-Spectrométrie de Masse (MEFS-CG-EM) est utilisée pour analyser les huiles essentielles et les composés volatils du houblon. Des études, comme celles de Jelén et al. (2012), montrent que la MEFS-CG-EM permet d'identifier une large gamme de composés volatils.

#### 3.4.1 Analyse des composés volatils par MEFS-CG-EM

**Objectif :** Analyser et identifier les composés volatils des échantillons de bière via la microextraction en phase solide (MEFS) couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse (CG-EM), pour caractériser le profil aromatique des bières enrichies en épices.

**Matériel :**

- SPME (Microextraction en phase solide) avec fibre (PDMS ou CAR/PDMS, selon l'échantillon)
- Flacons en verre hermétiques (10 ou 20 mL) avec septum en caoutchouc
- Agitateur magnétique avec barre aimantée
- Thermostat (pour incubation)
- Chromatographe en phase gazeuse (CG) couplé à un spectromètre de masse (EM)
- Colonne capillaire adaptée pour la séparation des composés volatils (ex. DB-WAX ou HP-5MS)
- Gaz vecteur (hélium ou azote)
- Ordinateur avec logiciel de traitement des données (pour l'analyse des spectres de masse)

## **Protocole d'analyse des composés volatils par MEFS-CG-EM :**

### 1. Préparation des échantillons :

- Prendre environ 1 g de houblon et le transférer dans des flacons de headspace de 20 mL.
- Ajouter 25 mL de solution saturée de NaCl aux flacons pour favoriser l'extraction des composés volatils.
- Sceller les flacons avec un septum en PTFE/silicone et une capsule en aluminium pour éviter la perte de composés volatils.

### 2. Extraction des volatils :

- Utiliser une fibre de MEFS avec une épaisseur de 50/30  $\mu\text{m}$  composée de Divinylbenzène/Carboxen/Polidiméthylsiloxane (DVB/CAR/PDMS).
- Placer les flacons dans un injecteur automatique CTC Combi PAL Sampler avec contrôle de température et agitation.
- Maintenir les échantillons à  $40^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  et agiter à 500 rpm pendant 20 minutes pour permettre l'équilibrage des composés volatils.
- Insérer la fibre MEFS dans les flacons et l'exposer à l'espace de tête des échantillons pendant 30 minutes pour extraire les composés volatils.

### 3. Analyse par CG-EM :

- Transférer la fibre MEFS dans l'injecteur d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse (CG-EM).
- Utiliser une injection sans division de flux (splitless) à une température d'injecteur de  $240^{\circ}\text{C}$ .
- Les conditions chromatographiques incluent une programmation de température du four : commencer à  $45^{\circ}\text{C}$  pendant 5 minutes, augmenter à un rythme de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  jusqu'à  $80^{\circ}\text{C}$ , puis à  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  jusqu'à  $240^{\circ}\text{C}$ , en maintenant cette température pendant 15 minutes.
- Séparer les composés volatils sur une colonne CP-Wax 52 CB (60 m x 0,25 mm x 0,25  $\mu\text{m}$ ).
- Détecter les composés à l'aide d'un spectromètre de masse dans une gamme de masse de 40-400 m/z.
- Identification des composés :

- Les composés volatils sont identifiés en comparant les spectres de masse obtenus aux références dans la bibliothèque NIST 11.
- Utiliser également l'indice de rétention linéaire de chaque substance, calculé à partir d'un étalon de calibration d'alcane (8 à 40 atomes de carbone), en utilisant l'équation de Van der Dool and Kratz.

$$I = 100 \times \left( n + \frac{\log(t'_R - t_0) - \log(t'_{Rn} - t_0)}{\log(t'_{Rn+1} - t_0) - \log(t'_{Rn} - t_0)} \right)$$

Où :

- **I** est l'indice de rétention linéaire.
- **n** est le nombre de carbones de l'alcane n- correspondant, pour lequel t<sub>Rn</sub> est le temps de rétention.
- **t'<sub>R</sub>** est le temps de rétention net du composé d'intérêt (c'est-à-dire le temps de rétention total t<sub>R</sub>, moins le temps mort t<sub>0</sub>, qui est le temps nécessaire pour qu'un composé non retenu traverse la colonne).
- **t'<sub>Rn</sub>** et **t'<sub>Rn+1</sub>** sont les temps de rétention nets des n-alcane adjacents à la molécule d'intérêt (c'est-à-dire ceux qui ont respectivement n et n+1 atomes de carbone).
- **t<sub>0</sub>** est le temps mort (ou temps de rétention d'un soluté non retenu).



## 4 Résultats

Malheureusement, en raison des divers problèmes rencontrés et décrits précédemment, tels que les grèves, les retards d'approvisionnement, et les problèmes techniques au sein de la microbrasserie, nous n'avons pas pu mener à bien les analyses physico-chimiques prévues des houblons *Comet* brésilien et américain ainsi que l'analyse sensorielle des bières qui devaient être produites à partir de ces houblons.

Dans cette section, nous allons donc présenter seulement les résultats de l'étude des bières enrichies en épices qui se concentrent sur l'impact de ces ajouts sur le profil sensoriel, l'amertume, la couleur, et la composition chimique des bières produites.

### 4.1 Résultats des analyses en contrôle de qualité

Les résultats des analyses physico-chimiques des quatre bières produites sont présentés dans le **Tableau 5** ci-dessous. Les mesures ont été effectuées en triplicata et les valeurs ont été traitées par analyse de variance (ANOVA) et par test de comparaison multiple des moyennes (test de Tukey), avec un niveau de signification de 5 % ( $p < 0,05$ ).

Les résultats des analyses des échantillons de bière révèlent des variations significatives en termes de teneur en alcool, densité, pH, couleur, et amertume.

#### **Teneur en Alcool (% v/v) :**

L'échantillon **Contrôle** présente la **teneur en alcool la plus faible** ( $6,20 \pm 0,05$  % v/v), tandis que les échantillons **A** ( $6,92 \pm 0,02$  % v/v) et **C** ( $6,90 \pm 0,03$  % v/v) affichent une augmentation par rapport au contrôle, indiquant un potentiel d'enrichissement en alcool.

#### **Densité (g/cm<sup>3</sup>) :**

La **densité** est la plus élevée dans l'échantillon **Contrôle** ( $1,0142 \pm 0,00004$  g/cm<sup>3</sup>), ce qui pourrait être lié à sa faible teneur en alcool. Les autres échantillons, **A** ( $1,0126 \pm 0,00005$  g/cm<sup>3</sup>) et **B** ( $1,0124 \pm 0,00003$  g/cm<sup>3</sup>), montrent une densité légèrement réduite.

### **pH** :

Le pH reste relativement stable à travers les échantillons, avec des valeurs variant de  $4,24 \pm 0,01$  pour le contrôle à  $4,28 \pm 0,04$  pour l'échantillon C. Ce léger écart ne semble pas affecter significativement les autres paramètres.

### **Couleur (EBC)** :

En termes de **couleur**, les échantillons montrent des valeurs similaires, avec le contrôle et l'échantillon A à  $26,00 \pm 0,00$  et  $26,33 \pm 0,58$ , respectivement, et une légère augmentation à  $27,00 \pm 0,00$  pour l'échantillon C.

### **Amertume (IBU)** :

L'**amertume** varie considérablement entre les échantillons. L'échantillon C affiche l'amertume maximale ( $30,50 \pm 0,48$  IBU), tandis que l'échantillon **Contrôle** présente la plus faible amertume ( $14,35 \pm 0,41$  IBU). Les échantillons A et B montrent également une augmentation de l'amertume avec des valeurs respectives de  $17,72 \pm 0,50$  et  $20,52 \pm 0,95$  IBU.

### **Observations Globales**

Les résultats montrent une tendance générale à l'augmentation de la teneur en alcool et de l'amertume dans les échantillons A, B, et C par rapport au contrôle, tandis que la densité et le pH restent relativement stables. Cette analyse suggère que les modifications apportées aux recettes des échantillons pourraient influencer positivement le profil organoleptique de la bière, notamment en termes d'amertume.

**Tableau 5** : Résultats des analyses physico-chimiques des bières

Échantillon	Teneur en alcool (% v/v)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Couleur (EBC)	Amertume (IBU)	Observations
<b>Contrôle</b>	6,20 ± 0,05	1,0142 ± 0,00004	4,24 ± 0,01	26,00 ± 0,00	14,35 ± 0,41	Teneur en alcool la plus faible, densité la plus élevée.
<b>A</b>	6,92 ± 0,02	1,0126 ± 0,00005	4,26 ± 0,01	26,33 ± 0,58	17,72 ± 0,50	Augmentation de la teneur en alcool et de l'amertume.
<b>B</b>	6,83 ± 0,10	1,0124 ± 0,00003	4,25 ± 0,01	26,67 ± 0,58	20,52 ± 0,95	Amertume élevée, pH stable.
<b>C</b>	6,90 ± 0,03	1,0119 ± 0,00003	4,28 ± 0,04	27,00 ± 0,00	30,50 ± 0,48	Amertume maximale, pH plus élevé.

## 4.2 Quantification des phénoliques et de l'activité antioxydante

L'analyse des composés phénoliques totaux (CFT) et de la capacité antioxydante des différentes bières a montré que l'ajout d'épices augmente significativement ces deux paramètres.

### Composés Phénoliques Totaux (mg EAG/L) :

La bière Contrôle (CT) présente une concentration de 324,1 ± 7,8 mg EAG/L, servant de référence. Les échantillons A (350,0 ± 0,7 mg EAG/L), B (350,4 ± 0,4 mg EAG/L), et C (353,7 ± 1,9 mg EAG/L) montrent une **augmentation** progressive des composés phénoliques par rapport au contrôle, avec des augmentations respectives de 8,0 %, 8,1 %, et 9,1 %.

### **Capacité Antioxydante (% d'inhibition du DPPH) :**

En ce qui concerne la capacité antioxydante, la bière CT présente un pourcentage d'inhibition de  $23,7 \pm 2,1$  %, tandis que les échantillons A et B affichent des valeurs respectives de  $36,3 \pm 2,1$  % et  $42,7 \pm 2,1$  %. L'échantillon C montre la capacité antioxydante la plus élevée, atteignant  $63,3 \pm 4,2$  %. Ces résultats indiquent une amélioration notable de la capacité antioxydante avec l'augmentation des composés phénoliques.

### **Augmentation des Composés Phénoliques et de la Capacité Antioxydante :**

En termes d'augmentation en pourcentage, l'échantillon C montre une augmentation de 167,1% de sa capacité antioxydante par rapport au contrôle, tandis que les échantillons A et B affichent des augmentations de 53,2 % et 80,2 %, respectivement.

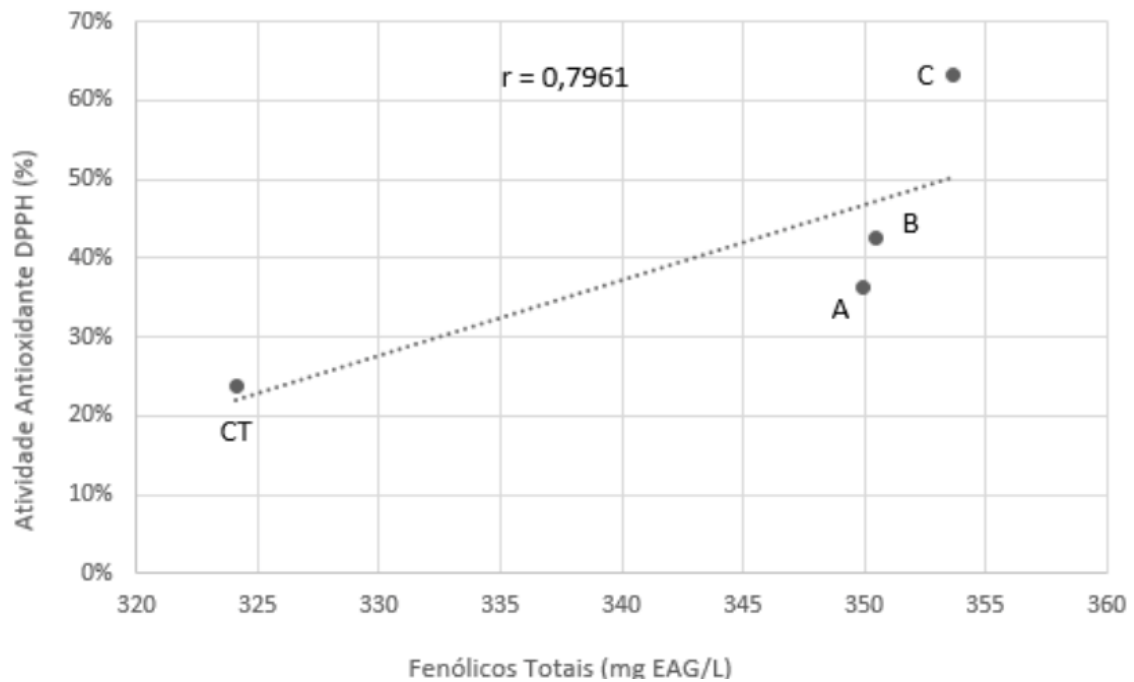
### **Observations Globales**

Les résultats suggèrent que les modifications apportées dans la formulation des échantillons de bière entraînent une augmentation des composés phénoliques totaux et, par conséquent, une amélioration significative de la capacité antioxydante. L'échantillon C se distingue par ses valeurs maximales, tant en termes de composés phénoliques que de capacité antioxydante, indiquant un potentiel bénéfique pour la qualité de la bière et ses effets sur la santé.

**Tableau 6** : Résultats des analyses des composés phénoliques et de la capacité antioxydante

<b>Bière</b>	<b>Composés Phénoliques Totaux (mg EAG/L)</b>	<b>Augmentation CFT (%)</b>	<b>Capacité Antioxydante (% d'inhibition du DPPH)</b>	<b>Augmentation (%)</b>
<b>CT</b>	$324,1 \pm 7,8$	0,0 %	$23,7 \pm 2,1$	0,0 %
<b>A</b>	$350,0 \pm 0,7$	8,0 %	$36,3 \pm 2,1$	53,2 %
<b>B</b>	$350,4 \pm 0,4$	8,1 %	$42,7 \pm 2,1$	80,2 %
<b>C</b>	$353,7 \pm 1,9$	9,1 %	$63,3 \pm 4,2$	167,1 %

Le graphique de corrélations révèle une relation forte et positive ( $r = 0,7961$ ) entre les CFT et l'AOX, soulignant que des niveaux plus élevés de CFT sont associés à une meilleure activité antioxydante. Ce résultat est crucial, car il démontre que l'enrichissement des bières avec des épices peut non seulement améliorer leurs propriétés antioxydantes, mais aussi potentiellement augmenter leur valeur ajoutée en termes de bénéfices pour la santé.



*Figure 9 : Graphique des corrélations entre les teneurs en CFT et l'AOX des bières analysées*

### 4.3 Présentation des résultats des analyses chimiques des échantillons de bières enrichie en épices

Les résultats d'analyse des **composés aromatiques** présents dans le curcuma, le poivre noir, la cannelle, ainsi que dans les bières (CT, A, B et C) mettent en évidence la diversité et la concentration de ces composés.








Par exemple, l'ar-turmerone, un composé majeur du curcuma, présente une concentration de 30,1 % dans cette épice, tandis que dans les bières, sa teneur augmente de manière marquée, atteignant 13,7 % dans la bière C. D'autres composés, tels que la turmerone et le curlone, montrent également des niveaux d'incorporation similaires dans les bières, avec des augmentations respectives allant jusqu'à 2,8 % pour la bière C. L'acétate de cinnamyle, bien que principalement associé à la cannelle avec une concentration de 12,9 %, se retrouve également dans les bières, avec des valeurs allant jusqu'à 13,2 % dans la bière C. Ces résultats indiquent une interaction significative entre les épices et le processus de brassage, suggérant que l'ajout d'épices peut enrichir le profil aromatique des bières, ce qui mérite une exploration plus approfondie pour comprendre pleinement l'impact sensoriel de ces composés.

**Tableau 7** : Principaux composés chimiques identifiés dans les différentes épices et échantillons de bières

Composés	Formule Moléculaire	Curcuma (% Aire)	Poivre noir (% Aire)	Cannelle (% Aire)	Bière CT (% Aire)	Bière A (% Aire)	Bière B (% Aire)	Bière C (% Aire)
Ar-turmerone	C15H20O	30,1%	-	4,3%	-	5,9%	7,4%	13,7%
Turmerone	C15H22O	11,9%	1,2%	1,6%	-	1,4%	1,8%	2,8%
Curlone	C15H22O	1,1%	1,6%	1,9%	-	1,2%	1,5%	2,0%
$\gamma$ -Eudesmol	C15H26O	2,9%	-	< 1%	-	< 1%	< 1%	1,4%
$\alpha$ -Cadinol	C15H26O	-	2,8%	-	-	< 1%	1,3%	1,3%
Dodecanoate d'éthyle	C14H28O2	-	-	-	1,1%	7,7%	4,3%	< 1%
Décanoate d'éthyle	C12H24O2	-	-	-	2,2%	6,0%	3,7%	2,1%
Acétate de cinnamyle	C10H10O2	-	-	12,9%	-	12,6%	8,0%	13,2%
Alcool isoamylique	C5H12O	-	-	-	5,0%	1,7%	2,5%	2,9%
Alcool phénéthylique	C8H10O	-	-	-	21,7%	4,4%	9,2%	7,6%
Alcool hydrocinnamique	C9H10O	-	-	-	-	3,2%	3,5%	12,3%
Acide octanoïque	C8H16O2	-	-	-	4,1%	1,5%	1,3%	1,6%
Acide décanoïque	C10H20O2	-	-	-	1,8%	2,0%	1,6%	1,6%
$\alpha$ -Copaène	C15H24	< 1%	5,1%	11,7%	-	-	-	-
$\alpha$ -Curcumène	C15H22	11,7%	1,7%	-	-	< 1%	< 1%	< 1%
$\alpha$ -Limonène	C10H16	< 1%	10,0%	-	-	-	< 1%	-
Zingibérène	C15H24	9,2%	-	-	-	< 1%	< 1%	< 1%
$\beta$ -Pinène	C10H16	-	8,5%	-	-	-	-	-
$\beta$ -Sesquiflandrène	C15H24	2,2%	2,5%	-	-	< 1%	< 1%	-
Cinnamaldéhyde	C9H8	-	-	12,9%	-	< 1%	< 1%	< 1%
Vinylguaïacol	C9H10O2	-	-	-	2,1%	< 1%	1,3%	1,3%

Source : Données de la recherche sur la bière avec addition d'épices à l'IFRJ (2024).

### Légende :

- |   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|  Cétones Terpènes          |  Alcools terpéniques |  Esters |  Acides organiques |
|  Hydrocarbures terpéniques |  Alcools             |  Autres |   |

## 5 Discussion

### 5.1 Interprétation des résultats

L'enrichissement des bières avec les épices, curcuma, poivre noir et cannelle, suscite un intérêt croissant dans le domaine brassicole, non seulement pour ses implications sensorielles, mais aussi pour ses potentiels bienfaits pour la santé. Les résultats obtenus dans cette étude révèlent l'impact significatif des épices sur les caractéristiques physico-chimiques et le profil aromatique des bières.

#### 5.1.1 Évaluation de l'influence des épices sur les échantillons

##### **Impact des épices sur le profil aromatique**

Les analyses ont montré que le curcuma est la source principale de composés volatils, apportant des terpènes tels que l'ar-turmerone, la turmérone et la curlone. Ces composés ont **migré** efficacement vers les bières enrichies, notamment dans les échantillons B et C, où la concentration d'épices était la plus élevée. La présence de ces terpènes a enrichi le profil sensoriel des bières, ajoutant des notes **boisées** et **terreuses**. La capacité des esters, tels que l'acétate de cinnamyle provenant de la cannelle, à migrer a également été notable, apportant des arômes **sucrés** et **épicés**, en particulier dans les échantillons B et C. En revanche, les hydrocarbures terpéniques tels que l' $\alpha$ -copaène et le  $\beta$ -pinène, bien que présents dans les épices, n'ont pas été détectés à des niveaux significatifs, ce qui peut s'expliquer par leur volatilité élevée et leur faible solubilité dans l'eau (Brown et al., 2021). Ce constat souligne l'importance de la solubilité des composés volatils dans le développement des arômes des bières.

##### **Influence des épices sur les caractéristiques physico-chimiques**

Les résultats montrent des différences marquées entre les bières enrichies en épices et la bière témoin (CT) en ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques. Par exemple, la teneur en alcool a légèrement augmenté dans les échantillons enrichis, atteignant 6,92 % pour l'échantillon A et 6,90 % pour l'échantillon C, contre 6,20 % pour la CT. Cette légère élévation est cohérente avec les études antérieures qui indiquent que l'ajout d'épices peut favoriser une

fermentation plus complète des sucres, entraînant une concentration d'alcool plus élevée (Smith, 2018). De plus, la densité des bières enrichies était généralement plus faible, ce qui reflète également l'effet de la fermentation.

L'amertume, mesurée en unités IBU, a également montré une tendance à l'augmentation, atteignant 30,50 IBU pour la bière C, comparée à 14,35 IBU pour la bière témoin. Cette augmentation pourrait être attribuée aux propriétés chimiques des épices, notamment du curcuma et du poivre noir, qui peuvent interagir avec le houblon pour intensifier l'amertume (Johnson & Miller, 2020).

### **Bénéfices pour la santé des bières enrichies**

Les analyses ont révélé une augmentation significative des CFT dans les bières enrichies, en particulier dans l'échantillon C, qui présentait une augmentation de 9,1 % des CFT par rapport à la bière témoin. Cela met en évidence la richesse en composés phénoliques des épices utilisées. Par ailleurs, la capacité antioxydante, mesurée par la méthode DPPH, a montré une augmentation significative, atteignant 167,1 % par rapport au témoin, confirmant les propriétés antioxydantes des épices (Johnson & Miller, 2020).

Ces composés phénoliques et antioxydants sont largement reconnus pour leurs effets bénéfiques sur la santé, tels que la réduction des risques de maladies cardiovasculaires, de cancer et de diabète (Liu et al., 2017). L'incorporation de ces épices dans les bières représente donc une opportunité d'élaborer des produits artisanaux qui non seulement plaisent aux consommateurs par leur goût, mais qui offrent également des avantages fonctionnels croissants dans une industrie en pleine évolution vers des produits plus sains.

### **Relation entre concentration d'épices et profil chimique**

L'étude a mis en lumière une corrélation directe entre la concentration d'épices et la diversité des composés volatils présents dans les échantillons. La bière C, qui contenait la plus forte concentration d'épices, a révélé une plus grande quantité de composés volatils, renforçant ainsi l'idée que l'augmentation des concentrations d'épices améliore à la fois le profil aromatique et les avantages pour la santé des bières artisanales. Cela suggère que les brasseurs peuvent manipuler les concentrations d'épices pour ajuster les caractéristiques organoleptiques de leurs produits.



## Perspectives d'amélioration futures

Pour améliorer la compréhension des impacts des épices sur les bières, il serait bénéfique d'intégrer des techniques analytiques avancées, telles que la HPLC. Cette méthode offrirait des informations sur les composés non volatils et les métabolites présents dans les échantillons de bière enrichis. La HPLC pourrait quantifier avec précision les composés phénoliques et identifier les métabolites formés durant la fermentation ou l'ajout d'épices, enrichissant ainsi notre compréhension des réactions chimiques. Une approche combinée des résultats de la HPLC et de la méthode de SMPE fournirait une vue d'ensemble plus complète des profils chimiques et aromatiques des bières, facilitant ainsi une meilleure corrélation entre les composés volatils et les caractéristiques organoleptiques observées.

### 5.1.2 Évaluation de la substitution du houblon *Comet* brésilien

Bien que nous n'ayons pas pu mener à bien les tests souhaités en raison de contraintes logistiques et de disponibilité des ressources, l'intérêt de cette comparaison réside dans la possibilité d'explorer les alternatives locales pour les brasseries brésiliennes.

**Tableau 8** : Avantages et inconvénients de la substitution du houblon importé par le houblon local au Brésil

<b>Avantages de la substitution du houblon brésilien</b>	<b>Inconvénients de la substitution du houblon brésilien</b>
<b>Réduction des coûts</b> : L'utilisation de houblon brésilien pourrait diminuer les coûts d'importation, rendant la production plus rentable pour les brasseries locales.	<b>Qualité variable</b> : La qualité du houblon brésilien peut ne pas être homogène, ce qui pourrait affecter la constance et la qualité des produits finaux.
<b>Soutien à l'économie locale</b> : En s'approvisionnant localement, les brasseries peuvent stimuler l'agriculture locale et promouvoir des pratiques durables.	<b>Manque de recherche</b> : Le manque de données sur les profils aromatiques et les propriétés des houblons brésiliens limite actuellement leur utilisation dans le brassage.
<b>Création de produits uniques</b> : Le houblon brésilien pourrait offrir des caractéristiques aromatiques distinctes, enrichissant ainsi l'offre de bières artisanales et permettant aux brasseries de se démarquer sur le marché.	<b>Adaptation des techniques de brassage</b> : Les brasseurs pourraient devoir adapter leurs méthodes de production pour tirer parti des caractéristiques spécifiques des houblons locaux.

<p><b>Moins de dépendance :</b> Réduire la dépendance vis-à-vis des houblons importés peut renforcer la résilience des brasseries face aux fluctuations du marché mondial.</p>	<p><b>Accès à la matière première :</b> Les brasseries pourraient rencontrer des difficultés d'approvisionnement en houblon brésilien si la production ne suit pas la demande croissante.</p>
--	---

## Perspectives et opportunités

Les résultats de notre étude sur les épices soulignent l'importance de l'innovation dans le brassage artisanal. En intégrant des houblons locaux dans la production, les brasseries pourraient non seulement améliorer la qualité de leurs produits, mais aussi se démarquer sur un marché de plus en plus compétitif. Il serait bénéfique d'encourager les collaborations entre les agriculteurs et les brasseurs pour développer des variétés de houblon adaptées au climat brésilien, favorisant ainsi une économie circulaire.

## Améliorations méthodologiques et élargissement des recherches

Pour maximiser les résultats de futures études, il est essentiel d'améliorer les méthodologies de recherche. Des suggestions incluent l'utilisation de méthodes analytiques avancées pour caractériser les composés aromatiques des houblons brésiliens et l'intégration d'études sensorielles pour évaluer l'impact des différents types de houblon sur l'acceptabilité des produits par les consommateurs. De plus, élargir les recherches pour inclure d'autres ingrédients locaux pourrait également offrir de nouvelles perspectives sur la création de bières artisanales innovantes.

# 6 Conclusion

## 6.1 Objectifs et principaux résultats

Ce mémoire avait pour objectifs d'explorer l'impact des épices sur la qualité des bières artisanales et de comparer les caractéristiques des houblons brésiliens et américains. Les résultats obtenus mettent en lumière les améliorations significatives de l'ajout d'épices, notamment le curcuma et la cannelle, qui ont conduit à une augmentation substantielle des composés phénoliques et de l'activité antioxydante dans les échantillons de bière. En ce qui concerne le projet de comparaison entre le houblon brésilien et américain, celui-ci n'a malheureusement pas pu être mis en œuvre. Cependant, la revue bibliographique approfondie

a enrichi notre compréhension du sujet, nous fournissant ainsi des informations précieuses et tous les éléments nécessaires pour initier ce projet dès que les problèmes techniques et logistiques seront résolus.

## 6.2 Perspectives pour de futures recherches

Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives prometteuses pour l'industrie brassicole brésilienne. D'une part, l'utilisation d'épices pourrait non seulement améliorer les propriétés organoleptiques des bières, mais aussi les rendre plus attrayantes d'un point de vue santé. D'autre part, la valorisation des houblons locaux pourrait réduire la dépendance aux importations et soutenir l'économie agricole nationale.

Pour aller de l'avant, il serait pertinent de mener des recherches supplémentaires afin d'approfondir la compréhension des profils aromatiques et des qualités des houblons brésiliens. L'exploration de différentes techniques analytiques, comme la chromatographie en phase liquide à haute performance, pourrait offrir une vue plus détaillée des composés présents dans les bières, tant volatils que non volatils. Il serait également intéressant d'évaluer l'acceptation du consommateur en réalisant une analyse sensorielle. De plus, l'évaluation des bénéfices pour la santé liée à la consommation de bières enrichies en épices représente une avenue intéressante pour renforcer l'attrait de ces produits sur le marché.

En somme, cette étude constitue une première étape vers l'optimisation des recettes de bière artisanale et la valorisation des ressources locales, contribuant ainsi à l'essor d'un secteur brassicole innovant et durable au Brésil.

## 7 Bibliographie

1. Abdel-Aal, E.-S. M., Akhtar, H., & Rabalski, I. (2022). Dietary Sources of Lutein and Zeaxanthin Carotenoids and Their Role in Eye Health. *Nutrients*, 14(6), 1317. <https://doi.org/10.3390/nu14061317>
2. Acosta-Rangel, A., Agehara, S., & Rechcigl, J. (2024). Double-season production of hops (*Humulus lupulus* L.) with photoperiod manipulation in a subtropical climate. *Scientia Horticulturae*, 332, 113177. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113177>
3. Aditya, P., Jain, P., & Ghosh, S. (2018). *Impact of curcumin on antioxidant properties in food matrices*. *Journal of Food Science*, 83(4), 1010-1017.

4. Almaguer, C., Schönberger, C., Gastl, M., Arendt, E.K., & Becker, T. (2014). *Humulus lupulus* – A story that begs to be told. *Journal of the Institute of Brewing*, 120(3), 289–314.
5. Aquino, F., Braga, F. P., Soares, R. T. R. N., Moraes, E. P., & Zini, C. A. (2019). Volatile profile of Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. *Food Research International*, 120, 353-361. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.065>
6. Aun, N. J. (2018). *Ambiente Serrana: Geografia e Clima*. *Revista de Ambiente e Cultura*, 42(1), 58-72.
7. Bamforth, C. (2016). *Brewing materials and processes: A practical approach to beer excellence*. Academic Press.
8. BARROS, C.; GHESTI, G. *Malte: essência da cerveja*. Brasília: Universidade de Brasília, 2016. 30 p. Brazil. (2023). *Anuário da Cerveja 2022*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília.
9. Brazil. (2023). *Anuário da Cerveja 2022*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília.
10. Brown, C., et al. (2021). *Impact of Terpenes on Aroma Development in Hop-Based Beverages*. *Journal of Brewing Science*, 45(3), 234-250.
11. Callemien, D., & al. (2020). *Craft beer and health: An overview of recent studies*. *Journal of the Institute of Brewing*, 126(2), 154-162.
12. Cajka, T., Riddelova, K., Tomaniova, M., & Hajsylova, J. (2010). Recognition of beer brand based on multivariate analysis of volatile fingerprint. *Journal of Chromatography A*, 1217, 4195–4203.
13. Canbas, A., Erten, H., & Ozsahin, F. (2001). *The effects of storage temperature on the chemical composition of hop pellets*.
14. Carbone, K., & Gervasi, F. (2022). *An updated review of the genus Humulus: A valuable source of bioactive compounds for health and disease prevention*. *Plants*, 11(24), 3434. <https://doi.org/10.3390/plants11243434>
15. Carvalhal Pinto, F. et al. (2023). *Sustainable analysis of craft beer using Brazilian hops*. *Journal of Food Science*, 88(4), 1123-1132.
16. Carvalho, L. M. et al. (2022). *Evaluation of aroma compounds in Brazilian beers: A comparative analysis*. *Food Research International*, 105, 50-58.
17. Castelhana, F. (2021). *Caracterização Geográfica e Ambiental do Rio de Janeiro*. *Estudos Geográficos*, 37(2), 45-65.
18. CERVBRAZIL, Anuário 2016. Disponível em: [link]. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

19. Dandan Yan (2018). Advanced gas Chromatography with mass Spectrometry for Phytoanalysis of hop, Chap1, page 2.
20. Durello, R., Silva, L., & Bogusz Jr, S. (2019). Química do Lúpulo. *Química Nova*, 42(8), 900–919. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170412>
21. Doe, J., et al. (2022). *Antioxidant Properties of Spice-Enhanced Craft Beers*. *International Journal of Food Science*, 56(7), 1120-1135.
22. Embrapa. (2023). Bioinsumo pode aumentar a produção de lúpulo no Brasil. Agência Brasil. Retrieved from <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-02/embrapa-testa-bioinsumo-para-aumentar-producao-de-lupulo>
23. Embrapa. (2019). *Avaliação Geográfica e Climática da Região Serrana*. Relatório Técnico, Embrapa Agroecologia.
24. European Brewery Convention – EBC (2007). *European Brewery Convention Analytica* (5th ed.). Fachverlag Hans Carl, Nurnberg, Germany.
25. Farag, M. A., & Wessjohann, L. A. (2012). Cytotoxic effect of commercial *Humulus lupulus* L. (hop) preparations – In comparison to its metabolomic fingerprint. *Journal of Advanced Research*, 4(4), 417–421.
26. Farag, M. A., & Wessjohann, L. A. (2012). Aroma profiling in hops: A study of terpenes and their impact on beer. *Journal of Advanced Research*, 7(2), 213-221.
27. Fischer, B., Gevinski, E.V., da Silva, D.M., Júnior, P.A.L., Bandiera, V.J., Lohmann, A.M., Rigo, D., Duarte, P.F., Franceschi, E., & Zandona, G.P. (2023). Effect of extraction time on the yield, chemical composition, and antibacterial activity of hop essential oil. *Current Microbiology*, 80(5), 237. <https://doi.org/10.1007/s00284-023-03359-0>
28. Freitas, C. F. (2019). Banco do Brasil abre linha de crédito de R\$ 600 milhões para cultivo de lúpulo no estado do Rio. Catalisi. Disponível em: <https://catalisi.com.br/banco-do-brasil-abre-linha-de-credito-de-r-600-milhoes-para-cultivo-de-lupulo-no-estado-do-rio/>. Acesso em 25 jul. 2023.
29. Geografia do Rio de Janeiro. (2021). *Características Físicas e Econômicas da Região Serrana*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Boletim Geográfico.
30. Gilmore, A. et al. (2008). Analyse des composés volatils dans les houblons : méthodes et applications. *Analytica Chimica Acta*, 623(4), 189-200.
31. Gilmore, A. et al. (2023). Comprehensive evaluation of Brazilian hops aroma compounds using SPME. *Analytica Chimica Acta*, 732(5), 122-130.

32. Giovan Kronenberger. (2024). Desenvolvimento e Caracterização de Cerveja com Adição de Cúrcuma (*Curcuma longa*), Pimenta-do-Reino (*Piper nigrum*) e Canela (*Cinnamomum Zeylanicum*).
33. Guimarães, P., & Matsui, M. (2021). Hops in Brazil: Potential and challenges. *Horticulturae*, 8(5), 393–408. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050393>
34. Guimarães, L. et al. (2021). Hops varieties and their impact on the flavor profile of beers brewed in Brazil. *Journal of Brewing Science*, 127(1), 45-56.
35. História Ambiental do Rio de Janeiro. (2022). *A Evolução da Paisagem Natural na Serra Fluminense*. Instituto de História, Revista de História Ambiental.
36. Horta, M. (2020). *Estudo sobre as Transformações Ambientais da Serra Fluminense*. *Revista Brasileira de Geografia*, 50(2), 150-170.
37. Hornsey, I. S. (2003). *A history of beer and brewing*. Royal Society of Chemistry.
38. IAL, Instituto Adolfo Lutz. (2008). Métodos químicos e físicos para análise de alimentos (4th ed.). São Paulo: IMESP.
39. Ibrahima, M., & al. (2020). *Les effets des épices sur les propriétés antioxydantes des aliments*. *Revue des Sciences Alimentaires*, 45(2), 123-135.
40. Jarouche Aun, N. (2018). *Ambiente Serrana: Aspectos Geográficos e Climatológicos da Região*. Faculdade de Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
41. Jastrombek, J.M., Fagherazzi, M.M., Pierezan, H.C., & Marques, V.V. (2022). Hop: An emerging crop in subtropical areas in Brazil. *Horticulturae*, 8(5), 393. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050393>
42. Jelén, H.H., Majcher, M., & Dziadas, M. (2012). Microextraction techniques in the analysis of food flavor compounds: A review. *Analytica Chimica Acta*, 738, 13–26.
43. Johnson, P., & Miller, R. (2020). *The Effect of Cinnamon and Curcumin on Beer Fermentation and Flavor Profile*. *Food Chemistry*, 65(4), 987-998.
44. Kralj, D., Zupanec, J., Vasilj, D., Kralj, S., & Pšeničnik, J. (1991). Variability of essential oils of hops, *Humulus lupulus*L. *Journal of the Institute of Brewing*, 97, 197–206.
45. Kovacevic, M., & Kac, M. (2001). Solid-phase extraction and HPLC determination of alpha and beta acids in hops. *Journal of Chromatography A*, 914(1-2), 101-110.
46. Leite, J.P.V. (2009). *Fitoterapia: Bases científicas e tecnológicas* (1st ed.). São Paulo: Editora Atheneu.
47. Liu, Y., & al. (2017). *Health benefits of phenolic compounds in food products: A review*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(9), 1831-1845.

48. MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2020). Anuário da Cerveja. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/com-crescimento-de-14-4-em-2020-numero-de-cervejarias-registradas-no-brasil-passa-de-1-3-mil/anuariocerveja2.pdf>. Acesso em 10 de agosto de 2023.
49. McKay, D. L., Blumberg, J. B., & Auld, G. W. (2019). The Role of Phytochemicals in the Prevention and Treatment of Disease: Implications for the Aging Population. *Journal of Nutrition, Health & Aging*, 23(2), 180-186.
50. Meussdoerffer, F. G. (2009). A comprehensive history of beer brewing. In *Handbook of brewing* (pp. 1-42). CRC Press.
51. Mongelli, F. et al. (2016). Conditions for hops cultivation in Italy: Influence on yield and quality. *Agricultural Science Journal*, 75(3), 523-532.
52. Nogueira, L. C. (2012). A importância dos compostos bioativos presentes na cerveja para a saúde (Monografia de Aperfeiçoamento/Especialização em Segurança Alimentar e Qualidade Nutricional). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro.
53. Odara, H., & Horta, M. (2020). Análise dos Aspectos Ambientais da Região Serrana do Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisa Ambiental do Brasil, *Revista Brasileira de Estudos Ambientais*.
54. Osovská, J., et al. (2016). *Humulus lupulus* L. (Hops) - A valuable source of compounds with bioactive effects for future therapies. *Military Medical Science Letters*, 85(1), 19–30.
55. Pinto, M.B.C. (2018). Isomerização de ácidos amargos de lúpulo Cascade cultivado no Brasil e seu desempenho durante a fermentação da cerveja. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 82p.
56. Retterberg, N., Biendl, M., & Garbe, L. (2018). The Effects of Water Irrigation on Hop Plants. *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, 76(1), 1-10.
57. Rossini, F., Virga, G., Loreti, P., Lacuzzi, N., Ruggeri, R., & Provenzano, M.E. (2021). *Humulus lupulus* L. as a novel multipurpose crop for the Mediterranean region of Europe: Challenges and opportunities. *Agriculture*, 11(6), 484. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060484>
58. Richter, S. et al. (2018). Extraction of hop compounds from Polish varieties using SPME and GC-MS. *Food Chemistry*, 267, 367-374.
59. Roberts, D. et al. (2024). Treprenoids analysis during fermentation and their influence on beer aroma. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 145(2), 200-215.

60. Sambrook, R. (1996). *Beer, hops, and the British: A cultural history of brewing*. Oxford University Press.
61. Santos, F.C. (2020). Variabilidade fenotípica de alfa ácido de lúpulo (*Humulus lupulus* L.) cultivados nas regiões do Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 54p.
62. Simões, C.M.O., et al. (2017). *Farmacognosia: Do produto natural ao medicamento*. Porto Alegre: Artmed.
63. Smith, L. (2018). *Terpenoids and Their Role in Beer Flavor: A Review*. *Brewing Research & Development*, 32(2), 145-159.
64. Spósito, M.B., Ismael, R.V., Barbosa, C.M.A., & Tagliaferro, A.L. (2019). A cultura do lúpulo. *Rev. Inst. Latic.* “Cândido Tostes”, 64(366), 12–21.
65. Souza, R. (2020). Estabelecimento in vitro, micropropagação e variação de lúpulo (*Humulus lupulus* L.). Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 80f.
66. Teixeira, L.V. (2009). Análise sensorial na indústria de alimentos. *Rev. Inst. Latic.* “Cândido Tostes”, 64(366), 12–21.
67. The Barth Report. Disponível em: [https://www.barthhaas.com/fileadmin/user\\_upload/news/2019-07-23/barthreport20182019en.pdf](https://www.barthhaas.com/fileadmin/user_upload/news/2019-07-23/barthreport20182019en.pdf)
68. Thomas, M. A., et al. (2021). Terpenoid content in hops and its impact on beer aroma. *Journal of Brewing Science*, 127(1), 13-24.
69. Verstrepen, K. J., et al. (2003). Impact of yeast genetics on beer flavor. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(8), 4065-4074.



## 8 Annexes

ANNEXE 1 : SPECTRES DES ÉCHANTILLONS DE BIÈRES

ANNEXE 2 : SPECTRE DE LA CANNELLE

ANNEXE 3 : SPECTRE DU CURCUMA

ANNEXE 4 : SPECTRE DU POIVRE NOIR

ANNEXES 5 : MICRO-BRASSERIE À L'IFRJ

ANNEXE 6 : CHROMATOGRAPHE UTILISÉ POUR LES ANALYSES DES COMPOSÉS VOLATILS

ANNEXE 7 : RÉACTION D'ISOMÉRISEMENT DE L'HUMULÈNE PENDANT LE PROCESSUS DU BRASSAGE

ANNEXE 8 : STRUCTURE CHIMIQUES DES PRINCIPAUX ACIDES-ALPHA DU HOUBLON

ANNEXE 9 : STRUCTURES CHIMIQUES DES PRINCIPAUX ACIDES PHÉNOLIQUES

ANNEXE 10 : PRINCIPAUX COMPOSÉS VOLATILS DE LA BIÈRE ET SES ARÔMES/SAVEURS

ANNEXE 11 : MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES POUR LA PRODUCTION DES ÉCHANTILLONS DE BIÈRE

ANNEXE 12 : ÉPICES UTILISÉS DANS LES BIÈRES

ANNEXE 13 : SOFTWARE BEERSMITH POUR LA CRÉATION DE RECETTE DE BIÈRE BELGIAN BLOND ALE

ANNEXE 14 : ÉCHANTILLONS DES BIÈRES PRODUITES

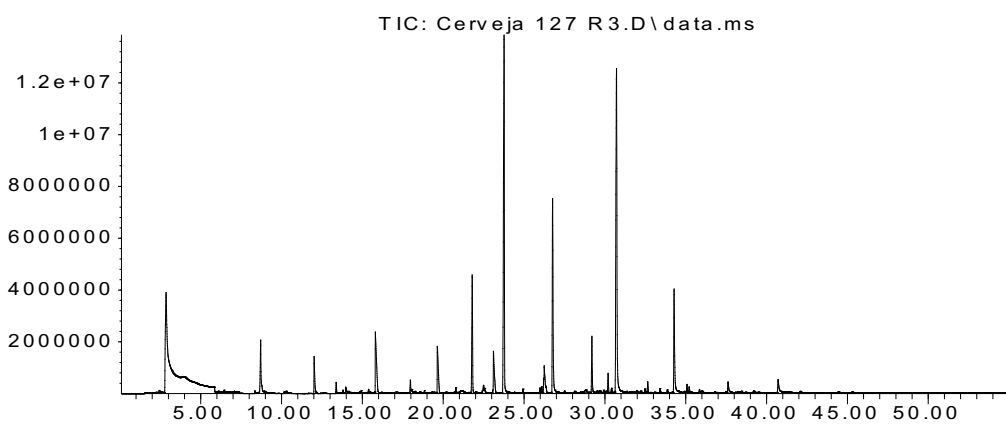
ANNEXE 14 : DIAGRAMME DE FABRICATION DE LA BIÈRE

ANNEXE 15 : ÉCRAN DE L'ALCOLYZER APRÈS ANALYSE DES ÉCHANTILLONS

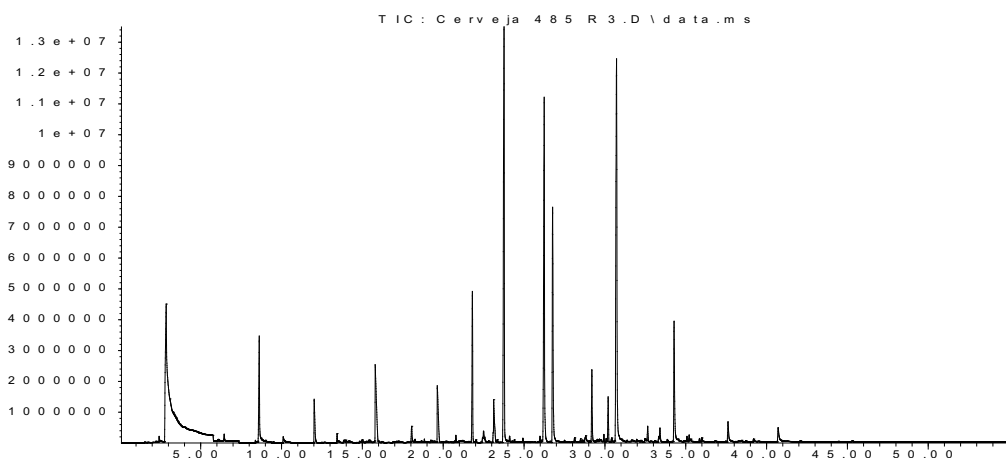
ANNEXE 16 : INDICES DE RÉTENTION ET NOM DES ÉCHANTILLONS ET DES ÉPICES

# ANNEXE 1 : SPECTRES DES ÉCHANTILLONS DE BIÈRES

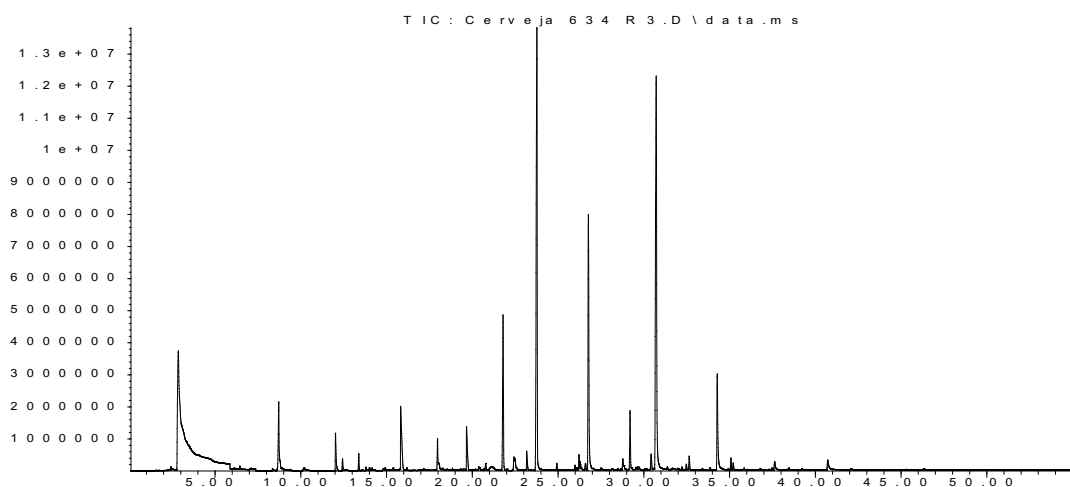
Abundance



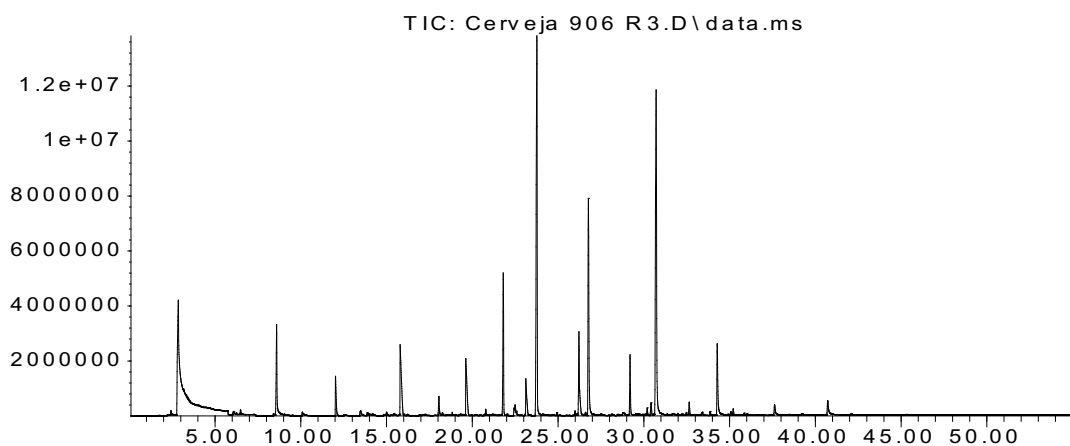
Abundance



Abundance

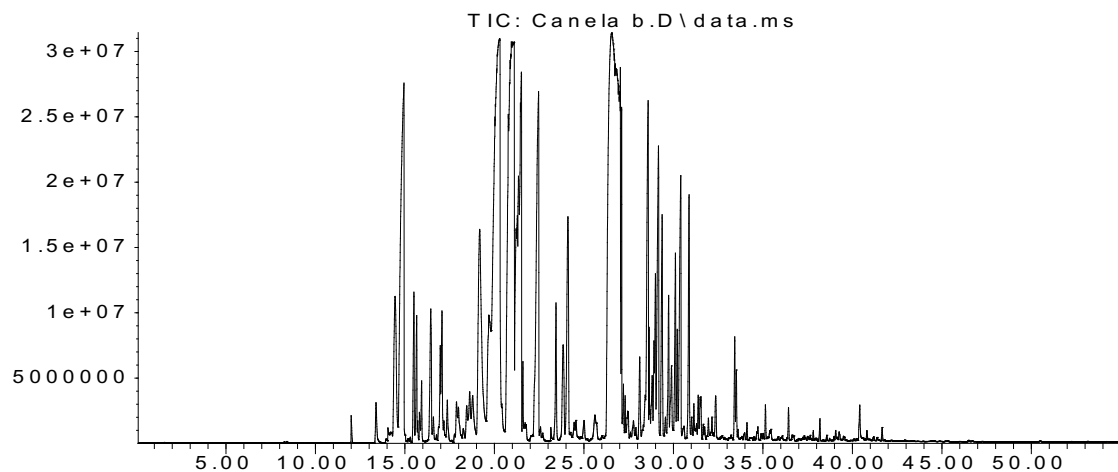


Abundance



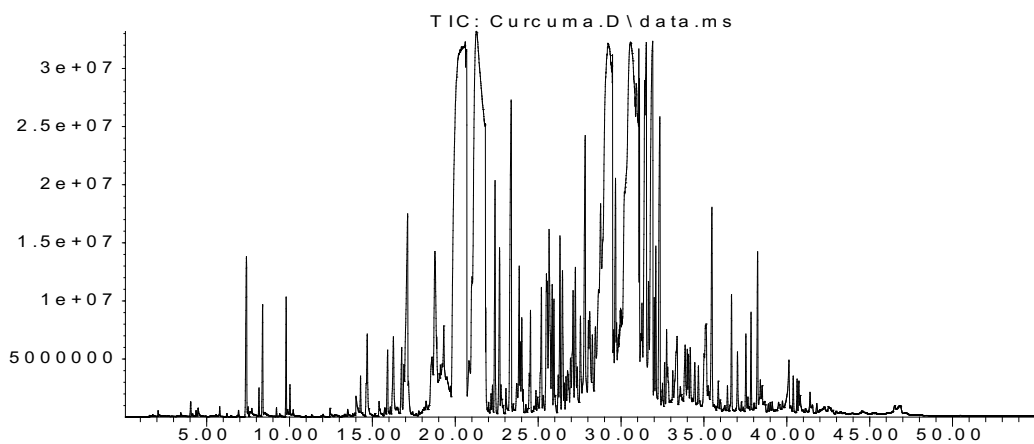
## ANNEXE 2 : SPECTRE DE LA CANNELLE

Abundance



## ANNEXE 3 : SPECTRE DU CURCUMA

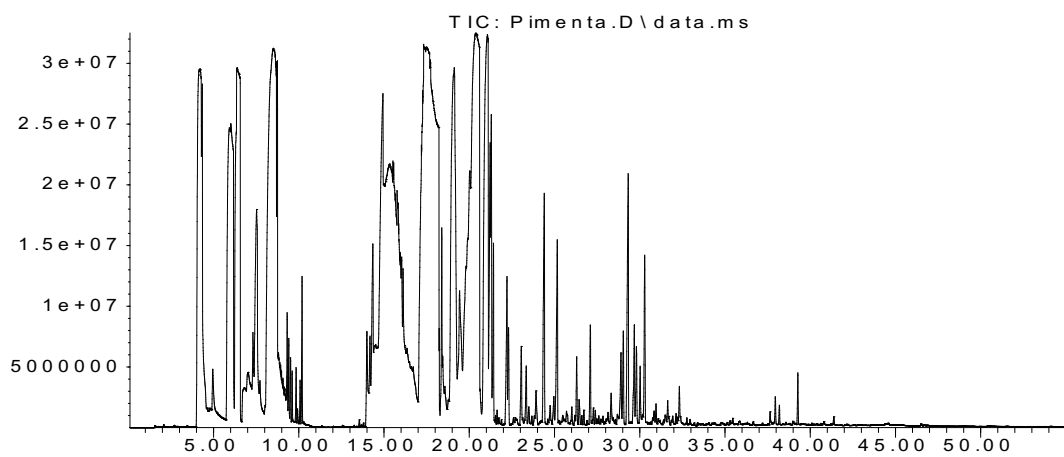
Abundance



Time-->

#### ANNEXE 4 : SPECTRE DU POIVRE NOIR

Abundance



Time-->

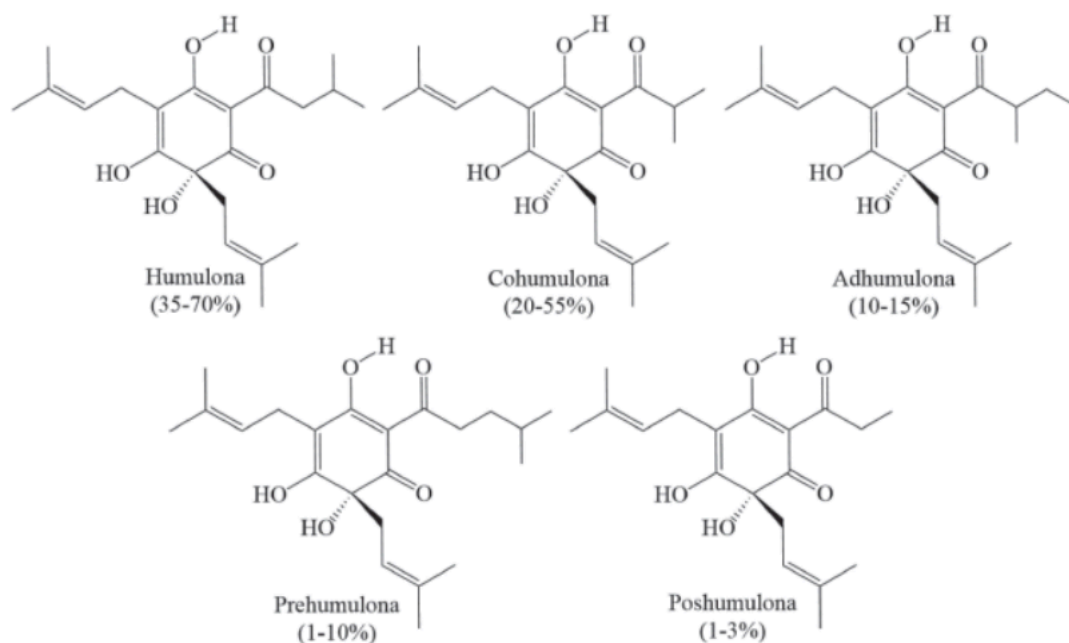
ANNEXES 5 : MICRO-BRASSERIE À L'IFRJ



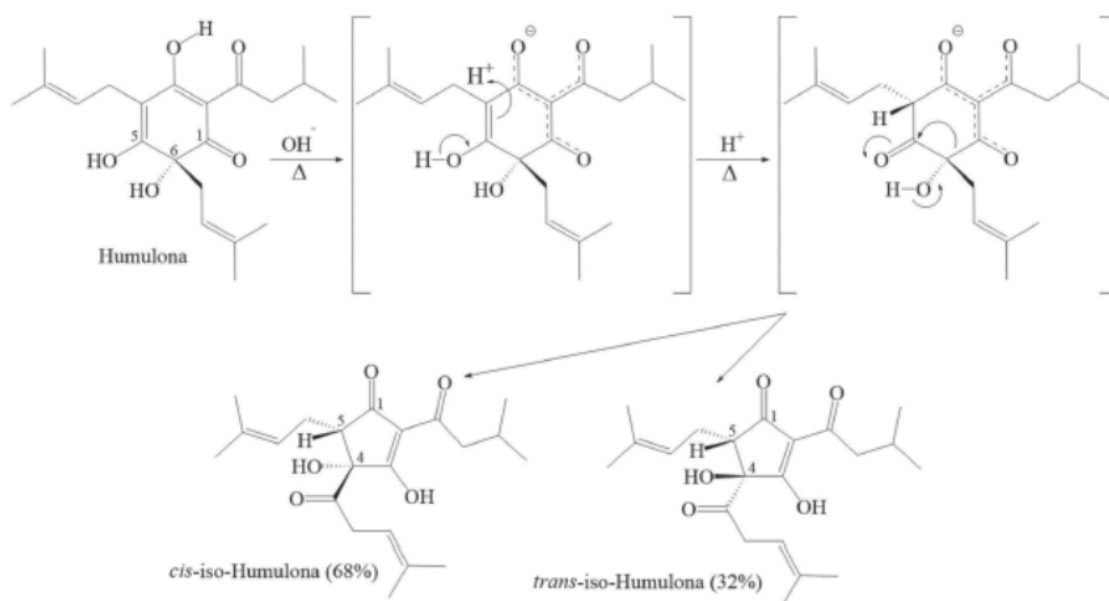
ANNEXE 6 : CHROMATOGRAPHE UTILISÉ POUR LES ANALYSES DES COMPOSÉS VOLATILS



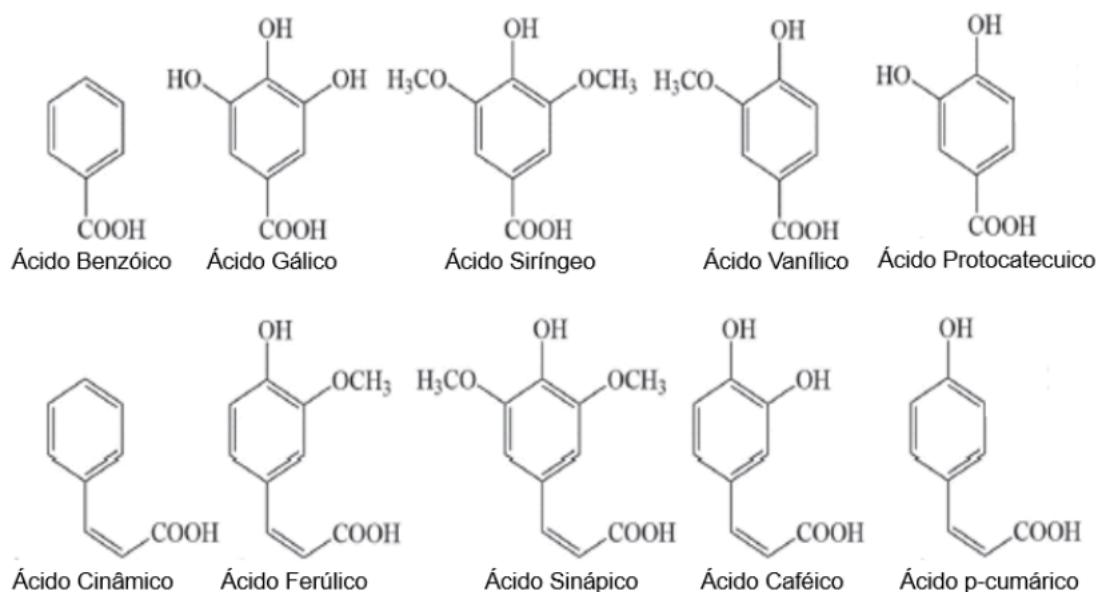
ANNEXE 7 : RÉACTION D'ISOMÉRISEMENT DE L'HUMULÈNE PENDANT LE PROCESSUS DU BRASSAGE



ANNEXE 8 : STRUCTURE CHIMIQUES DES PRINCIPAUX ACIDES-ALPHA DU HOUBLON



## ANNEXE 9 : STRUCTURES CHIMIQUES DES PRINCIPAUX ACIDES PHÉNOLIQUES



## ANNEXE 10 : PRINCIPAUX COMPOSÉS VOLATILS DE LA BIÈRE ET SES ARÔMES/SAVEURS

Composé Volatil	Aroma/Saveur
Alcools :	
Éthanol	Alcoolique
n-propanol	Alcoolique ; Solvant
Méthyl-butanol (isoamylique)	Banane, Vineux ; Doux
Phényléthanol (alcool phénéthylique)	Floral ; Roses ; Parfum ; Amer
Acides carboxyliques :	
Acide éthanoïque (acétique)	Acide ; Vinaigre ; Astringent
Acide propanoïque (propylique)	Acide ; Vinaigre ; Lait
Acide butanoïque (butyrique)	Rance ; Vomis
Acide méthyl-butanique (isovalérique)	Rance ; Fromage ; Sueur ; Vieux houblon

Acide hexanoïque (caproïque)	Huile végétale ; Sueur
Acide octanoïque (caprylique)	Fromage de chèvre ; Suif
Acide décanoïque (caprique)	Odeur de bouc
Esters :	
Acétate d'éthyle	Doux ; Vernis
Acétate d'isoamyle	Banane ; Poire ; Fruité
Acétate de phénéthyle	Roses ; Miel ; Doux
Butyrate d'éthyle	Fruits tropicaux ; Ananas
Hexanoate d'éthyle	Pomme ; Fruits ; Doux
Octanoate d'éthyle	Pomme ; Fruits ; Doux
Décanoate d'éthyle	Caprylique ; Fruité ; Doux
Composés carbonylés :	
Éthanal (acétaldéhyde)	Pomme verte
Méthylbutanal	Banane verte
Hexanal	Herbacé
Nonéanal	Papier mouillé
2,3 Butanodione (diacétyl)	Beurre
2,3 Pentanodione (acétylpropionyl)	Beurre ; Caramel
Composés soufrés :	
Diméthylsulfure (DMS)	Légumes cuits ; Maïs doux
Sulfure d'hydrogène (gaz sulfhydrique)	Oeuf pourri
3-Méthyl-2-butène-1-thiol (MBT)	Moufette
p-Menta-8-thiol-3-one	Urine de chat
Diméthyl-trisulfure (DMTS)	Oignon



Terpéniques :	
$\beta$ -Myrcène	Balsamique ; Herbacé
$\alpha$ -Humulène	Boisé ; Épicé
$\beta$ -Caryophyllène	Boisé ; Épicé
$\beta$ -Farnésène	Boisé ; Citronné ; Doux
Linalol	Floral ; Fruité
Géraniol	Roses ; Floral
Citronellol	Citron ; Lime
Nérol	Rose douce
Néroliol	Rose ; Citronné
$\alpha$ -Bisabolol	Floral
Oxyde d'humulène	Cèdre
Autres :	
Chlorophénol	Hospitalier ; Sparadrap
Chloroanisole	Moisi
Sulfate ferreux	Métallique

ANNEXE 11 : MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES POUR LA PRODUCTION DES ÉCHANTILLONS DE BIÈRE



## ANNEXE 12 : ÉPICES UTILISÉS DANS LES BIÈRES



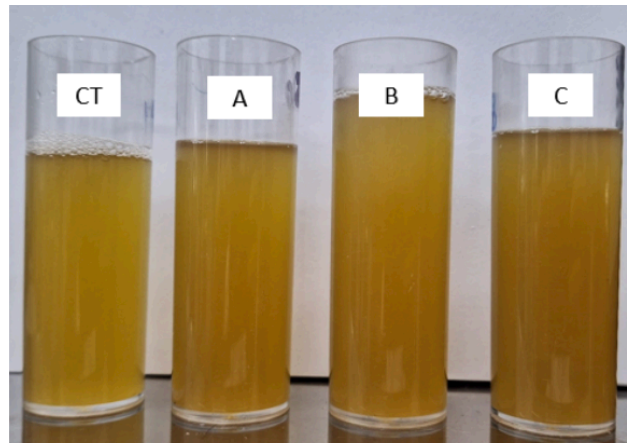
## ANNEXE 13 : SOFTWARE BEERSMITH POUR LA CRÉATION DE RECETTE DE BIÈRE BELGIAN BLOND ALE

The screenshot shows the BeerSmith 2 software interface for creating a recipe. The main window displays the recipe details for "Blond Ale IFRJ". The ingredients list includes:

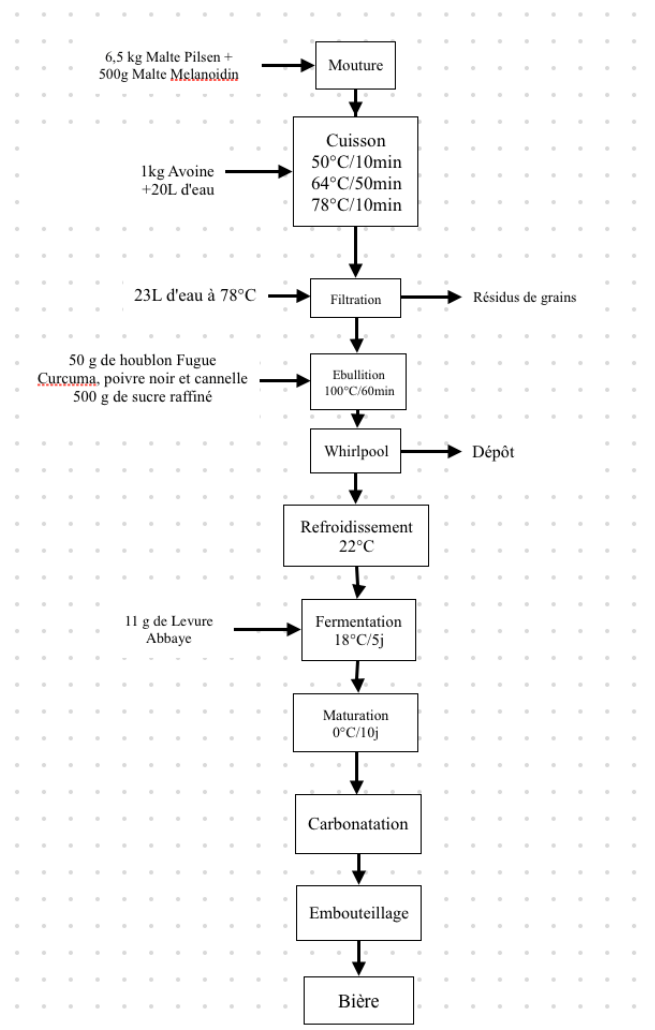
Amount	Name	Type	#	%/IBU	Inventory
11,00 kg	Pilsen (Agraria) (3,9 EBC)	Grain	1	76,5 %	0,00 kg
2,00 kg	Oats, Flaked (2,0 EBC)	Grain	2	11,8 %	0,00 kg
1,00 kg	Melanoidin (Weyerermann) (5),1 EBC)	Grain	3	5,9 %	0,00 kg
60,00 g	Fuggite, U.S. [5,70 %] - Boil 10,0 min	Hop	6	4,2 IBUs	0,00 g
50,00 g	Fuggite, U.S. [5,70 %] - Boil 20,0 min	Hop	5	5,8 IBUs	0,00 g
40,00 g	Perle [3,50 %] - Boil 10,0 min	Hop	7	4,6 IBUs	0,00 g
100,00 g	Cinnamon Powder (Boil 5,0 mins)	Spice	8	-	0,00 g
30,00 g	Chilis (Secondary 7,0 days)	Spice	10	-	0,00 g
1,00 kg	Cane (Beet) Sugar (0,0 EBC)	Sugar	4	5,9 %	0,00 kg
2,0 pkg	Abbaye Belgian (Lallemand/Danstar #:-)	Yeast	9	-	0,0 pkg

The bottom section of the interface shows a "Style Guide Comparison" for "Belgian Blond Ale". It includes sliders for Est Original Gravity (1,066 SG), Bitterness (14,7 IBUs), Color (11,3 EBC), and Est ABV (7,0 %). The "Select Fields" section shows Total Grains (17,00 kg), Total Hops (150,00 g), Bitterness Ratio (0,223 IBU/SG), Est Pre-Boil Gravity (1,061 SG), Est Final Gravity (1,013 SG), and Measured OG (1,048 SG).

## ANNEXE 14 : ÉCHANTILLONS DES BIÈRES PRODUITES



## ANNEXE 14 : DIAGRAMME DE FABRICATION DE LA BIÈRE



ANNEXE 15 : ÉCRAN DE L'ALCOLYZER APRÈS ANALYSE DES ÉCHANTILLONS

▶ Sample Name:	c#1
▶ Density Condition:	valid
▶ Alcohol (% v/v):	6.93 %v/v
▶ Density:	1.01184 g/cm <sup>3</sup>
▶ Alcohol (% w/w):	5.40 %w/w
▶ Er (real extract) (% w/w):	5.92 %w/w
▶ Ea (app. extract) (% w/w):	3.49 %w/w
▶ p (original extract) (% w/w):	16.16 °Plato
▶ Calories (kJ/100 mL):	248.42 kJ/100ml

ANNEXE 16 : INDICES DE RÉTENTION ET NOM DES DES ÉCHANTILLONS ET DES ÉPICES

LRI	RT	COMPOSTO	CT	A	B	C	CANELA	CURCUMA	PIMENTA
1034	2,087	Acetone						2224484	
1041	2,478	Ethyl Acetate	1714771	1259700	1715558	4626379			
1049	2,966	Ethanol	102751871	55908771	127604947	96678597			
1057	3,445	Acetic acid ethenyl ester						189451	
1060	3,64	2,3-Butanediol, dinitrate			6019746				
1065	3,98	Acetoin			15234066				
1067	4,066	.alpha.-Pinene							71222533
1069	4,174	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 2-methyl-5-(1-methylethyl)-							23915401
1072	4,366	R(-)3,7-Dimethyl-1,6-octadiene						3327590	
1073	4,462	Propanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester				2260299			
1074	4,49	Toluene						4418823	
1081	4,916	Camphene							3638452
1098	5,976	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-						106521	
1100	6,072	Bicyclo[3.1.1]heptane, 6,6-dimethyl-2-methylene-, (1S)-							171196368
1103	6,141	1-Propanol, 2-methyl-		942099	1155011	1272182			
1112	6,304	Sulfur dioxide						171033	
1123	6,518	1-Butanol, 3-methyl-, acetate	1990448	4199042	3163712	12753081			
1125	6,544	.alpha.-Phellandrene						12740360	115060877
1182	7,627	Ethanone, 1-cyclopropyl-2-(4-pyridinyl)-					203360		
1184	7,654	.beta.-Pinene							33573108
1214	8,263	D-Limonene					534301	1032917	241470006
1216	8,31	Eucalyptol		1389870				7834715	
1227	8,553	.beta.-Phellandrene							44061157
1239	8,829	Hexanoic acid, ethyl ester	2661501	1041224		2182409			
1243	8,912	2-Propen-1-amine			1691520				

1244	8,951	1-Butanol, 3-methyl-	15803352	17701962	16777051	17067883		
1257	9,232	1-Pentanol			745508			
1259	9,282	.gamma.-Terpinene					342827	4884534
1261	9,332	Styrene	560811	2902143		1126326		
1269	9,514	.beta.-Ocimene						4278398
1284	9,833	o-Cymene					7620406	3581362
1294	10,076	(+)-4-Carene					1473280	4562049
1350	11,352	2-Oxabicyclo[2.2.2]octan-6-ol, 1,3,3-trimethyl-					492108	536652
1379	12,026	Cyclohexasiloxane, dodecamethyl-		1946616	1672609			2531386
1384	12,135	Acetic acid, 2-ethylhexyl ester			819943			
1394	12,371	Tetradecane	266915				731365	
1398	12,462	2-Nonanone					1215256	
1426	13,102	Ethanone, 1-(1,3-dimethyl-3-cyclohexen-1-yl)-						432421
1435	13,316	Octanoic acid, ethyl ester	12593315	10744027	11609050	34794639		
1436	13,34	Benzene, 1,3-bis(1,1-dimethylethyl)-					475042	
1438	13,384	Copaene				14871189		
1454	13,743	Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	596299	669241				
1458	13,83	1,5-Heptadien-4-one, 3,3,6-trimethyl-					2138610	
1466	14,032	Acetic acid					6961768	5911082
1471	14,15	7-Oxabicyclo[2.2.1]heptane, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-						15710270
1477	14,275	Pyrazine, tetramethyl-					6468925	
1480	14,348	Cyclohexene, 4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methylethenyl)-1-(1-methylethyl)-, (3R-trans)-						228489182
1484	14,448	Cyclosativene					84981126	
1495	14,704	1-Hexanol, 2-ethyl-			1552005			
1498	14,763	Pentadecane	465288					
1503	14,882	Undecane, 3,8-dimethyl-	407800					
1506	14,945	.alfa.-Copaene					314749396	23305592
1526	15,402	2-Nonanol					2697407	
1528	15,464	Benzaldehyde					1525230	

1530	15,503	1,4-Methano-1H-indene, octahydro-4-methyl-8-methylene-7-(1-methylethyl)-, [1S-(1.alpha.,3a.beta.,4.alpha.,7.alpha.,7a.beta.)]-					71094747		
1541	15,747	.alpha-Cedrene						3121738	
1545	15,854	alfa.-Copaene							122302132
1547	15,881	2,3-Butanediol, [R-(R*,R*)]-						19012602	1162310
1549	15,931	11-Methylene-tricyclo[5.3.1.1(2,6)]dodecane					14286876		
1552	16,013	Bicyclo[3.1.0]hexan-2-ol, 2-methyl-5-(1-methylethyl)-, (1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)-							41501983
1553	16,02	1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimethyl-	879915	1000227					14636065
1555	16,084	4-Acetyl-1-methylcyclohexene						1727893	
1561	16,213	1H-3a,7-Methanoazulene, 2,3,4,7,8,8a-hexahydro-3,6,8,8-tetramethyl-, [3R-(3.alpha.,3a.beta.,7.beta.,8a.alpha.)]-		837648					
1565	16,314	2-Cyclohexen-1-ol, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-, cis-							2641752
1571	16,443	Isosativene					55799697		
1577	16,592	9-Hexadecen-1-ol, (Z)-					6586361		
1590	16,873	Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-						12501967	
1594	16,974	Cyclohexane, 1-ethenyl-1-methyl-2,4-bis(1-methylethenyl)-, [1S-(1.alpha.,2.beta.,4.beta.)]-					23945466		
1598	17,071	Caryophyllene					47159463	89325542	
1599	17,09	Caryophyllene							
1600	17,107	Hexadecane	447926					2717960	
1602	17,165	2-Undecanone						4582488	
1611	17,371	Isolongifolene, 9,10-dehydro-					11241613		
1623	17,638	2-Decanol						828016	
1629	17,786	1H-Cycloprop[e]azulene, 1a,2,3,4,4a,5,6,7b-octahydro-1,1,4,7-tetramethyl-, [1aR-(1a.alpha.,4.alpha.,4a.beta.,7b.alpha.)]-					2893770		
1634	17,883	2H-1-Benzopyran, 3,4,4a,5,6,8a-hexahydro-2,5,5,8a-tetramethyl-, (2.alpha.,4a.alpha.,8a.alpha.)-					16140271		
1637	17,951	Decanoic acid, ethyl ester	6916765	12702515	26582596	60745505			
1638	17,99	1H-Cyclopropa[a]naphthalene, 1a,2,3,5,6,7,7a,7b-octahydro-1,1,7,7a-tetramethyl-, [1aR-(1a.alpha.,7.alpha.,7a.alpha.,7b.alpha.)]-					15517631		9729044

1644	18,119	Aromandendrene							2928778
1652	18,309	.gamma.-Elemene							37707983
1655	18,365	1,4,7,-Cycloundecatriene, 1,5,9,9-tetramethyl-, Z,Z,Z-			2013738				40487639
1656	18,388	Spiro[5.5]undec-2-ene, 3,7,7-trimethyl-11-methylene-, (-)-	1059185	2017745	1766565	4744766			
1658	18,435	Alloaromadendrene							15129469
1658	18,453	Naphthalene, 1,2,4a,5,8,8a-hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)-, [1S-(1.alpha.,4a.beta.,8a.alpha.)]-					16429449		
1662	18,533	(E)-.beta.-Famesene	588831						
1664	18,595	Azulene, 1,2,3,3a,4,5,6,7-octahydro-1,4-dimethyl-7-(1-methylethenyl)-, [1R-(1.alpha.,3a.beta.,4.alpha.,7.beta.)]-							4230027
1665	18,618	Humulene					24451365		
1670	18,729	3-Furaldehyde							550392
1684	19,037	Isocaryophyllene						24337107	
1688	19,138	Ethyl trans-4-decenoate	11901824	4714750	6690265	38338740			34333707
1690	19,177	.alpha.-Muurolene					2542055	959784	
1694	19,279	.alpha.-Terpineol		1084193				38230076	
1713	19,695	Cadinene					259414		
1717	19,777	.beta.-Bisabolene			710417				
1717	19,781	1,3-Cyclohexadiene, 5-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-2-methyl-, [S-(R*,S*)]-		1622385		2225440		26498698	
1718	19,795	2-Undecanol	590079						
1741	20,294	alpha-Cadinene					304837554		
1741	20,3	Zingiberene						371923603	
1744	20,355	Spiro[2.4]heptane, 1,5-dimethyl-6-methylene-			791899				
1759	20,684	.beta.-curcumene							91866208
1759	20,691	Cyclohexene, 3-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-6-methylene-, [S-(R*,S*)]-			1093098	2278581		90795751	60851021
1760	20,71	1-Decanol	398863						
1762	20,746	1-Piperidinecarboxaldehyde							490037
1765	20,81	6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, (R)-	792755	1235581					
1770	20,935	Benzene, 1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-4-methyl-		2851703	1898015	2078322			41002268



1772	20,973	.β-Cadinene					39455779		
1774	21,017	Oxime-, methoxy-phenyl-	1600292						
1781	21,176	Benzenemethanol, 4-methyl-.alpha.-(1-methyl-2-propenyl)-, (R*,R*)-		838892					
1796	21,5	α-Curcumene						472576050	
1798	21,529	2,6-Octadien-1-ol, 3,7-dimethyl-, (Z)-	775338						2357367
1799	21,565	Naphthalene, 1,2,4a,5,6,8a-hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)-, [1S-(1.alpha.,4a.beta.,8a.alpha.)]-							1256575
1812	21,828	Acetic acid, 2-phenylethyl ester	17323590	9603762	21082967	32196845			
1816	21,905	6,11-Dimethyl-2,6,10-dodecatrien-1-ol							1496325
1825	22,105	1,4-Methanobenzocyclodecene, 1,2,3,4,4a,5,8,9,12,12a-decahydro-		3823073	1522440	1558582		47877448	7274511
1831	22,217	Anethole						4811334	
1837	22,357	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-1,6-dimethyl-4-(1-methylethyl)-, (1S-cis)-						6427836	36963966
1840	22,403	Dodecanoic acid, ethyl ester	3324018	5230718	30966404	77598237			
1843	22,467	Benzene, 1,2-bis(1-buten-3-yl)-					135461727		
1846	22,527	2,6-Octadien-1-ol, 3,7-dimethyl-	1614643						
1849	22,59	Benzenemethanol, .alpha.,.alpha.,4-trimethyl-							2070430
1850	22,621	Hexanoic acid	583769						
1851	22,636	7-Methylene-bicyclo[3.3.1]nonan-3-one oxime						27358566	
1855	22,72	Cyclohexene, 1-(1-propynyl)-						4890349	
1858	22,79	Ethanone, 1-(1-cyclohexen-1-yl)-							2633891
1862	22,876	Pentadecanoic acid, 3-methylbutyl ester		618004	3282184	8179084			
1871	23,047	Benzofuran, 6-ethenyl-4,5,6,7-tetrahydro-3,6-dimethyl-5-isopropenyl-, trans-							3271165
1874	23,112	Cyclononasiloxane, octadecamethyl-			3297815				
1877	23,182	Benzene, 1,1'-(1,1,2,2-tetramethyl-1,2-ethanediyl)bis-		28812895	13603097	10423112	4948066	97441118	3126570
1882	23,28	Benzenepropanoic acid, ethyl ester		8292661	2677439	3098176			
1885	23,337	.alpha.-Bromomesitylene						73814822	
1885	23,353	4-epi-cubedol							25313702
1888	23,412	Chloromethyl 8-chlorododecanoate				1132843			

1890	23,441	2-Propenal, 3-phenyl-					33174657		
1891	23,462	2,6-Dibromo-4-nitrophenyl-.beta.-phenylpropionate						3175015	
1892	23,499	6-epi-shyobunol							4172052
1898	23,613	Oxacyclotridecan-2-one				1126874			
1902	23,694	Bicyclo[3.3.1]nonane, 1-phenyl-							2389382
1902	23,701	Quinoline, 2,4-dimethyl-						5126272	
1907	23,805	Cadala-1(10),3,8-triene		1592366					3692756
1908	23,828	1,2,3-Trimethyl-cyclopent-2-enecarboxaldehyde						34393469	
1909	23,839	(E)-1-(2,3,6-trimethylphenyl)buta-1,3-diene (TPB, 1)					40857730		
1909	23,84	Phenylethyl Alcohol	68600683	46912253	65765364	44745981			
1912	23,895	3,4,5,6,7,8-Hexahydro-2H-chromene						13188260	
1916	23,985	p-Menthane, 3-allylperoxy-						10748117	
1918	24,027	3-Decenoic acid				2875531			
1921	24,075	4-(2,4-Dimethylcyclohex-4-enyl)but-3-en-2-one						4181484	
1922	24,108	.alpha.-Calacorene					113178347	17076173	8478174
1929	24,244	5-Isopropenyl-2-methyl-7-oxabicyclo[4.1.0]heptan-2-ol						1990102	
1939	24,437	1-Naphthalenol, 1,2,3,4,4a,7,8,8a-octahydro-1,6-dimethyl-4-(1-methylethyl)-, [1S-(1.alpha.,4.alpha.,4a.beta.,8a.beta.)]-							87090171
1939	24,438	1,4-Methanoazulen-7(1H)-one, octahydro-1,5,5,8a-tetramethyl-						7421584	
1940	24,457	Bicyclo[6.3.0]undec-1(8)-en-3-one, 2,2,5,5-tetramethyl-					8087595		
1941	24,487	3-Phenyl-1-propanol, acetate		81678300	57156667	127051716			
1943	24,524	[4-(Acetaminomethyl)phenyl]methanamine						17217782	
1945	24,555	Tetradecanal					7952560		
1947	24,6	3,7-Octadiene-2,6-diol, 2,6-dimethyl-							1668935
1947	24,605	p-Toluic acid, pent-2-en-4-ynyl ester		6260159					
1965	24,955	1-Undecanol	626052						1083136
1971	25,087	1,2,3,4-Tetrahydro-3-isopropyl-5-methyl-1-oxonaphthalene							2098178
1976	25,175	Caryophyllene oxide						84046678	77746536

1977	25,199	Spiro[4.5]dec-6-en-8-one, 1,7-dimethyl-4-(1-methylethyl)-		3772418				19389455	
1992	25,491	9-Isopropyl-1-methyl-2-methylene-5-oxatricyclo[5.4.0.0(3,8)]undecane							17925606
2004	25,744	Farnesene epoxide, E-							16724815
2005	25,761	Phenol							2431937
2013	25,917	trans-3-Caren-2-ol		1156923					
2015	25,952	2,4-Dimethylphenethyl alcohol						7868649	
2023	26,105	1,3-Hexadiene, 3-ethyl-2,5-dimethyl-	1037728		1294501	1636057			
2030	26,23	Cyclohexanone, 3-vinyl-3-methyl-							5319542
2032	26,277	Cinnamaldehyde, (E)-		2181448	1339838	1736856		28557630	
2035	26,337	Longipinocarvone							17499581
2039	26,41	1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-, [S-(Z)]-	4011705						
2040	26,424	Nerolidol 2			2956589	3374429			
2042	26,466	1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-, (E)-							10517848
2043	26,484	3-Phenylpropanol		75860619	25200242	31850718			
2047	26,568	Tetradecanoic acid, ethyl ester	1231654	1903156	10627529	30564702			
2050	26,63	Carotol							4931813
2052	26,668	Benzenebutanal, .gamma.,4-dimethyl-						29837621	
2053	26,672	.alpha.-Cubebene	719513				10907434		23091951
2057	26,755	Cinnamaldehyde					346679720		
2062	26,858	Octanoic acid	13103840	9796576	9439781	14731916			
2066	26,937	Globulol							3721021
2067	26,938	.alpha.-Benzylphenethylamine						12594020	
2067	26,94	Isoamyl laurate				3841177			
2074	27,075	Cyclohexanemethanol, 4-ethenyl-.alpha.,.alpha.,4-trimethyl-3-(1-methylethenyl)-, [1R-(1.alpha.,3.alpha.,4.beta.)]-		1295435					42243474
2075	27,108	cubedol					41047774		
2085	27,289	Z-7-Tetradecenoic acid				3001649			
2086	27,306	2(1H)-Naphthalenone, 4a,5,6,7,8,8a-hexahydro-7.alpha.-isopropyl-4a.beta.,8a.beta.-dimethyl-					7297825		

2089	27,37	p-Cresol							1240737
2091	27,409	Lauryl acetate				1673733			
2098	27,546	7-epi-cis-sesquisabinene hydrate						116487173	
2102	27,619	(7a-Isopropenyl-4,5-dimethyloctahydroinden-4-yl)methanol							5646481
2109	27,749	cis-sesquisabinene hydrate							5032169
2116	27,873	1H-Cycloprop[e]azulen-7-ol, decahydro-1,1,7-trimethyl-4-methylene-, [1a-(1a.alpha.,4a.alpha.,7.beta.,7a.beta.,7b.alpha.)]-							5514786
2122	27,992	Cyclohexanol, 1,3,3-trimethyl-2-(3-methyl-2-methylene-3-butenylidene)-, (Z)-							2135071
2123	28,001	2-Naphthalenemethanol, 1,2,3,4,4a,5,6,7-octahydro-.alpha.,.alpha.,4a,8-tetramethyl-, (2R-cis)-	8967909	4035139	3692893	6292980			
2132	28,17	(+)-epi-Bicyclosesquiphellandrene							7993706
2135	28,231	Agarospinol	4897838	2010874					
2138	28,281	Ethanol, 2-phenoxy-							3283723
2140	28,324	Hexadecanal					3926081		
2142	28,358	.beta.-Guaiene							26829764
2146	28,425	.beta.-bisabolol	3569183						5437127
2146	28,437	2-Propen-1-ol, 3-phenyl-, formate		2125709			143712349		
2146	28,439	Acetic acid, cinnamyl ester				2057101			
2153	28,551	Benzene, 1,2,4-trimethyl-		2697270		2163499			
2153	28,557	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	4287407						
2155	28,594	.alpha.-ylangene							3950743
2158	28,646	3,7-Cycloundecadien-1-ol, 1,5,5,8-tetramethyl-					17663032		
2159	28,665	Benzene, 1-(3-cyclopentylpropyl)-2,4-dimethyl-	2195107						
2160	28,688	Mesitylene					4345740		
2161	28,713	Bicyclo[4.4.0]dec-1-ene, 2-isopropyl-5-methyl-9-methylene-	1276193						
2164	28,768	Nonanoic acid, 2-phenylethyl ester				495804			
2167	28,82	Epizonarene					13231852		
2171	28,886	1-Tetradecanol	2255517			1995125			
2171	28,895	Tumerone	17201694	12624700	13932229	42601366	479449108	28827038	

2172	28,907	1-Tetradecene			5340591				
2172	28,916	1-Naphthalenol, decahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methylethylidene)-, [1R-(1.alpha.,4a.beta.,8a.alpha.)]-					21847884		5629123
2172	28,917	Hexadecen-1-ol, trans-9-				7118720			
2181	29,074	.alpha.-Cadinol							67918519
2192	29,275	2-Methoxy-4-vinylphenol	6676525	8065322	9117255	9166933			
2197	29,372	.gamma.-Muurolene					78813370		
2204	29,507	p-Toluic acid, 4-nitrophenyl ester				1994594			
2211	29,622	Azulene, 1,4-dimethyl-7-(1-methylethyl)-			932567				1984049
2215	29,687	Naphthalene, 1,6-dimethyl-4-(1-methylethyl)-							
2216	29,713	4-Hydroxy-3-methylacetophenone						7912076	
2217	29,731	.alpha.-Bisabolol							60944678
2217	29,732	Naphthalene, 1,6-dimethyl-4-(1-methylethyl)-					34705931		1136265
2221	29,802	1,4-Methano-1H-indene, octahydro-1,7a-dimethyl-4-(1-methylethenyl)-, [1S-(1.alpha.,3a.beta.,4.alpha.,7a.beta.)]-	869855				145872268		
2221	29,806	Piperonal							30202456
2233	30,011	Curlone		12094914	10626157	11604760	51782491	45764118	38984230
2244	30,215	Longiverbenone					28826990		
2251	30,334	(-)-Spathulenol							52887669
2252	30,344	Ar-tumerone		84426307	52922481	59115876	116168104		
2253	30,374	Octadecanoic acid, ethyl ester	4173183	1958064	9761654	12267437			
2258	30,455	Hexadecanoic acid, ethyl ester			38075809	60871672			
2260	30,5	Ar-tumerone						1216200192	
2261	30,508	2,6,10-Dodecatrien-1-ol, 3,7,11-trimethyl-, acetate, (E,E)-			1961909				
2262	30,522	Phenol, 3,4-dimethoxy-							845696
2265	30,587	6,10-Dodecadien-1-ol, 3,7,11-trimethyl-	841073	1579670	1367589	1331130			
2273	30,725	Longifolenaldehyde	2600434						20296444
2276	30,775	n-Decanoic acid	5667366	9791600	11296722	20218695			
2278	30,809	Benzenepropanal		867829					
2279	30,836	Ethyl 9-hexadecenoate		6145673	25977353	40994255			

2282	30,874	2-Propen-1-ol, 3-phenyl-				71059432		2995697
2282	30,887	Tetracyclo[6.3.2.0(2,5).0(1,8)]tridecan-9-ol, 4,4-dimethyl-						41059555
2294	31,088	7-Oxabicyclo[4.1.0]heptane, 1-(2,3-dimethyl-1,3-butadienyl)-2,2,6-trimethyl-, (E)-		6449005				
2295	31,111	trans-Sesquisabinene hydrate					53482536	4147048
2312	31,409	Cyclohexane, 3,4-bis(1-methylethenyl)-1,1-dimethyl-						3213465
2314	31,443	Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	1110613					
2314	31,447	Pentanoic acid, 5-hydroxy-, 2,4-di-t-butylphenyl esters		1374967				
2322	31,578	Benzenepropanol, 2-methoxy-		1482657				
2327	31,661	Longipinocarveol, trans-						9095603
2327	31,667	3,5,9-Trimethyl-deca-2,4,8-trien-1-ol				3949075	63039251	
2332	31,748	1-Propyl-3-(propen-1-yl)adamantane				3211911		
2338	31,842	9-Decenoic acid	3172441	1671320	1576137	6562655		
2344	31,956	1-Methyl-6-(3-methylbuta-1,3-dienyl)-7-oxabicyclo[4.1.0]heptane				7764549		
2345	31,962	Octadecanal						4634805
2350	32,048	Ledene oxide (II)						2918935
2352	32,095	2,6,10-Dodecatrien-1-ol, 3,7,11-trimethyl-	2528270		6283835	7963221		
2375	32,488	Oxalic acid, di(2-phenylethyl) ester			879715	1820713		
2376	32,49	Bicyclo[5.2.0]nonane, 4-methylene-2,8,8-trimethyl-2-vinyl-					12917045	
2377	32,51	Cyclotetradecane	465474	623584				
2377	32,513	1-Hexadecanol			2672752			
2387	32,686	Benzene, 1,1'-(1,2-cyclobutanediyl)bis-, trans-	1054997		2544434	3647497		
2387	32,692	Benzene, 1,1'-(1,2-cyclobutanediyl)bis-, cis-		1857675				
2390	32,742	Corymbolone					54510910	
2390	32,743	Catecholborane	784262					
2390	32,744	1,2,4-Triazolo[4,3-a]pyrazine		1459026	1201230	1265081		
2413	33,117	Benzene, 1-[1,1-dimethylethyl]-4-[2-propenyloxy]-					19656936	
2418	33,206	cis-Z-.alpha.-Bisabolene epoxide						2752292
2430	33,4	.alpha.-Santalol						2513438

2432	33,427	2-Propenal, 3-(2-methoxyphenyl)-					25232530		
2437	33,515	2-Propenoic acid, 3-(2-hydroxyphenyl)-, (E)-					17231570		
2473	34,111	1-Naphthalenol, 5,6,7,8-tetrahydro-2,5-dimethyl-8-(1-methylethyl)-					7186478		1422122
2478	34,184	Ethyl Oleate	866798	5005353	8919986	12010545			
2481	34,245	2,4a,5,8a-Tetramethyl-1,2,3,4,4a,7,8,8a-octahydronaphthalen-1-ol							4298871
2489	34,366	Dodecanoic acid	1865362	3338472	7893092	16887930			
2507	34,668	2,3-Dioxabicyclo[2.2.2]oct-7-en-5-one, 1-(3-oxo-1-butenyl)-6,6,7-trimethyl							1480832
2508	34,676	Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methyl-1-phenylethyl)-						37577205	
2509	34,691	Fumaric acid, di(3-phenylpropyl) ester		355673					
2509	34,699	Propanoic acid, 2-methyl-, 3-phenylpropyl ester				964274			
2511	34,722	Phenol, 2,4,6-tris(1-methylethyl)-					4059181		
2522	34,908	7,8-Epoxy-.alpha.-ionone							5813659
2525	34,957	Linoleic acid ethyl ester	953043						
2526	34,958	9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester		3598443	4872545	3860117			
2537	35,132	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	642501	648322					
2537	35,135	Phthalic acid, hex-3-yl isobutyl ester			851486				
2537	35,137	Phthalic acid, 5-methylhex-2-yl butyl ester				971374			
2537	35,138	Phthalic acid, isobutyl non-5-yn-3-yl ester							1665900
2537	35,144	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-					8324906		
2552	35,376	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylpropyl)-		2637386	1165059			79560427	
2557	35,457	Vanillin					2980199		2174053
2583	35,878	Cetene							2179175
2591	35,998	Oxalic acid, nonyl 2-phenylethyl ester			900235	2867253			
2612	36,32	Phytol							3501907
2618	36,416	Benzyl Benzoate		306856			7571618		
2618	36,422	Benzoic acid, 2-phenylhydrazide	164076						
2634	36,66	(-)-Spathulenol							2357930
2691	37,536	Phthalic acid, 6-ethyl-3-octyl butyl ester							523958

2697	37,635	Pentaethylene glycol							4004880
2701	37,689	Tetradecanoic acid	798410	1245372	1571646	3590644			
2708	37,8	Phenol, 5-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-2-methyl-, (R)-			1196768				
2709	37,803	Phenol, 2-methyl-5-(1,2,2-trimethylcyclopentyl)-, (S)-		2606645			2786510	37017011	
2718	37,945	6,6,10-Trimethylundeca-3,8,10-triene-2,7-dione							6347857
2734	38,182	2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-							3821611
2735	38,187	2H-2a,7-Methanoazuleno[5,6-b]oxirene, octahydro-3,6,6,7a-tetramethyl-					6015922		
2760	38,569	1,4-Methanoazulen-7(1H)-one, octahydro-4,8,8,9-tetramethyl-, (+)-					2822224	20072713	
2788	38,97	2-Propenal, 3-(1,3-benzodioxol-5-yl)-					1297607		825141
2789	38,995	2-Butanone, 4-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-						5624355	
2912	40,78	n-Hexadecanoic acid	2240562	3623104	4209036	6735750		8550129	
2939	41,188	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-					1571100		
2948	41,327	Hexadecenoic acid, Z-11-			1737758	3530526			
2969	41,659	Cyclopropanecarboxylic acid, (adamantanyl-1)methyl ester					4727245		
3211	46,496	Diphenyl sulfone							1456809
3217	46,677	Piperidine, 1-(1-oxo-3-phenyl-2-propenyl)-							1303371