



ISA Lille  
48 boulevard Vauban  
59046 Lille Cedex



Brewing Theory  
52 rue Gabriel Péri  
59700 Marcq-en-Baroeul

Rapport de stage assistant ingénieur en R&D

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

Pour la validation du stage assistant ingénieur

Tuteur de stage : Becquart Théodore  
Enseignant référent : Lachever Mathieu



## Résumé :

Ces dix dernières années, les microbrasseries artisanales françaises ont connu un grand essor plaçant la France à la place du 1er pays européen en nombre de brasseries en 2020. La popularité des bières artisanales s'explique par des produits plus élaborés et diversifiés ainsi qu'une production locale qui plaît de plus en plus. Face à cette croissance et passionné par la bière, Théodore Becquart crée en 2019 Brewing Theory, une agence de conseil brassicole. Son activité vise à aider les brasseries dans le développement de leur projet, de nouvelles recettes, mais aussi dans la gestion des problèmes rencontrés lors de la production en proposant des formations et un accompagnement personnalisé.

Récemment, le contexte géopolitique a eu pour effet d'augmenter le coût des matières premières et de l'énergie. Le processus de brassage étant très énergivore, le monde brassicole est fortement touché et les microbrasseries craignent l'augmentation du gaz et de l'électricité à l'approche de 2023. Ainsi, des solutions faciles et rapides à mettre en œuvre doivent être mises en place pour limiter la consommation d'énergie. Une des possibilités consiste à modifier l'une des étapes du brassage de la bière : l'ébullition. Initialement d'une durée de 60 minutes, celle-ci pourrait être écourtée de 15 minutes. Ainsi, le but de cette étude est d'estimer l'impact d'une réduction de 15 minutes du temps d'ébullition sur la bière et d'en estimer la faisabilité pour les brasseurs.

Celle-ci a montré que la bière issue d'un temps de réduction plus court possède une couleur plus claire mais ne semble pas présenter de différences sensorielles. L'étude de la consommation d'énergie durant le brassage a permis de déterminer que la réduction du temps d'ébullition était intéressante en termes d'économies d'énergies. Pour mettre en place cette solution, seule une réadaptation mineure de la recette sur les quantités de houblon, de malt et d'eau est nécessaire. Cette modification du processus de brassage demeure alors une solution immédiate, intéressante énergétiquement et facile à mettre en place pour les microbrasseries.

Mots clés : économie d'énergie ; brassage ; ébullition ; bière ; microbrasserie

## Abstract :

Over the last ten years, the number of french microbreweries increased a lot and made France become the first european country in terms of the number of breweries in 2020. Popularity of craft beers is explained by the diversity and more sophisticated products. Moreover, people appreciate that those types of beer are produced locally. Facing this growth and passionate by beer, Théodore Becquart created Brewing Theory in 2019, a consulting agency specialized in beer brewing. Its activity aim to help breweries in the development of their projects, new recipes, but also in the management of the production and the related problems thanks to the formations and a customized accompanying. Recently, the geopolitic context caused an increase of the cost of the raw materials and energy. The brewing process being energy intensive is particularly affected and microbreweries are afraid of the rise of gas and electricity costs as 2023 approaches. Thereby, quick and easy to implement solutions must be found to limit energy consumption. One of the possibilities is to modify one of the brewing steps : boiling. Usually, boiling last 60 minutes but this duration could be shortened by 15 minutes. The goal of this study is to estimate the impact of a 15 minutes reduction of the boil time on the beer and to estimate the feasibility for brewers.

This study showed that beer produced with a shortened boiling time has a clearer colour but doesn't seem to have any sensorial differences. The study of the energy consumption during brewing allowed to determine that the reduction of boiling time was interesting in terms of energy savings. To implement this solution, only a small reconfiguration of the recipe concerning hops, malt and water is necessary. This modification of the brewing process remain then an immediate energy saving solution and easy to implement for microbreweries.

Keywords : energy saving ; brewing ; boiling ; beer ; microbrewery

# Remerciements

Je souhaiterais adresser mes remerciements à Théodore Becquart, gérant et fondateur de Brewing Theory. En m'accueillant dans sa structure pendant deux mois, Théodore m'a permis de travailler dans un domaine qui me passionne. Grâce à ses conseils et son expertise, j'ai acquis les bases de la gestion de projet et du développement de produit, compétences clés pour ma future carrière d'ingénieur.

Je remercie également Mathieu Lachever, mon enseignant référent qui m'a accompagné pour le stage et la rédaction de ce rapport.

Je souhaiterais également remercier Anaïs Follet, étudiante alternante chez Brewing Theory et Pauline Chane-Kon, stagiaire chez Brewing Theory pendant une partie de mon stage. En m'apportant leur aide pour la réalisation de certaines analyses, elles m'ont permis de réaliser cette étude dans de bonnes conditions.

# Lexique

**Degré plato (°P)** Le degré plato est une unité de mesure permettant d'exprimer le pourcentage en masse d'extrait sec du moût

**Densité spécifique** La densité spécifique d'un produit est le rapport entre sa masse volumique et celle de l'eau

**Enzyme** Protéine accélérant les réactions chimiques

**Fermentation basse** Type de fermentation se déroulant généralement à une température comprise entre 10 et 15°C

**Fermentation haute** Type de fermentation dans laquelle les levures se trouvent à la surface du moût et se déroulant généralement à une température comprise entre 18 et 25°C

**First wort hopping** Méthode d'houblonnage consistant à ajouter le houblon dans le moût chaud (70-80°C), une fois transféré en cuve d'ébullition, durant l'étape de rinçage des drêches

**Hopstand** Infusion de houblon durant l'étape de whirlpool après ébullition

**Moût** Jus sucré obtenu en salle de brassage avant fermentation

**pH** Potentiel hydrogène : il mesure l'état acido-basique d'une solution contenant des ions H<sup>+</sup>

**Point isoélectrique** Le point isoélectrique désigne le pH auquel les protéines sont neutres : elles ne sont ni chargées positivement ni négativement

**Pouvoir diastasique** Capacité d'un malt à produire les enzymes nécessaires à la conversion de l'amidon en sucres fermentescibles et non-fermentescibles

**Raw beer** Bière brassée sans ébullition

# Sommaire

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>BREWING THEORY, ENTREPRISE INNOVANTE DANS LE SECTEUR DE LA BOISSON .....</b>	<b>2</b>
II.1.	HISTOIRE DE L'ENTREPRISE .....	2
II.2.	DESCRIPTION DE L'ENTREPRISE ET DE SES ACTIVITES.....	2
<b>III.</b>	<b>BRASSAGE DE LA BIÈRE : PROCESSUS, EBULLITION, CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET CONTEXTE GÉOPOLITIQUE.....</b>	<b>4</b>
III.1.	PROCESSUS DE FABRICATION DE LA BIÈRE .....	4
III.1.1.	<i>Les matières premières de la bière .....</i>	<i>4</i>
III.1.2.	<i>Du concassage à l'empâtage.....</i>	<i>5</i>
III.1.3.	<i>L'ébullition.....</i>	<i>6</i>
III.1.4.	<i>La fermentation.....</i>	<i>6</i>
III.1.5.	<i>Le conditionnement .....</i>	<i>7</i>
III.1.6.	<i>Point sur la densité en brasserie .....</i>	<i>7</i>
III.2.	LES PROCESSUS BIOCHIMIQUES MIS EN JEU DURANT L'EBULLITION DU MOUT .....	8
III.2.1.	<i>Stérilisation du moût.....</i>	<i>8</i>
III.2.2.	<i>Coagulation des protéines et amélioration de la stabilité colloïdale .....</i>	<i>8</i>
III.2.3.	<i>Dénaturation des enzymes .....</i>	<i>8</i>
III.2.4.	<i>Dissolution et transformation des composés du houblon .....</i>	<i>9</i>
III.2.5.	<i>Élimination du diméthylsulfure (DMS) .....</i>	<i>10</i>
III.2.6.	<i>Réaction de Maillard et développement de la couleur.....</i>	<i>11</i>
III.2.7.	<i>Réduction du temps d'ébullition : les potentiels impacts .....</i>	<i>11</i>
III.3.	CONTEXTE GÉOPOLITIQUE ET INFLUENCE SUR LE MONDE BRASSICOLE.....	11
III.3.1.	<i>Une crise des matières premières et de l'énergie .....</i>	<i>11</i>
III.3.2.	<i>Focus sur le gaz.....</i>	<i>12</i>
III.4.	CONSOMMATION D'ÉNERGIE EN BRASSERIE .....	14
III.4.1.	<i>Répartition des consommations d'énergie.....</i>	<i>14</i>
III.4.2.	<i>Consommation d'énergie durant une ébullition de 60 minutes.....</i>	<i>14</i>
III.4.3.	<i>Adaptation du processus de brassage et économies d'énergie .....</i>	<i>17</i>
<b>IV.</b>	<b>MÉTHODOLOGIE ET MOYENS MIS EN ŒUVRE .....</b>	<b>19</b>
IV.1.	ORGANISATION DU TRAVAIL ET RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES .....	19
IV.1.1.	<i>Création d'un diagramme de Gantt.....</i>	<i>19</i>
IV.1.2.	<i>Recherches bibliographiques.....</i>	<i>19</i>
IV.2.	MÉTHODOLOGIE POUR LE BRASSAGE ET LE CONDITIONNEMENT .....	19
IV.2.1.	<i>Choix de la recette .....</i>	<i>19</i>
IV.2.2.	<i>Composition de la recette.....</i>	<i>20</i>
IV.2.3.	<i>Journée de brassage .....</i>	<i>21</i>
IV.2.4.	<i>Fermentation et conditionnement.....</i>	<i>21</i>
IV.3.	MÉTHODOLOGIE POUR LES ANALYSES .....	22
IV.3.1.	<i>Observation des sédiments du moût.....</i>	<i>22</i>
IV.3.2.	<i>Mesures de densité et pH.....</i>	<i>22</i>
IV.3.3.	<i>Mesure de l'EBC et du TAV .....</i>	<i>23</i>
IV.3.4.	<i>Mesure du CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dissous .....</i>	<i>24</i>
IV.3.5.	<i>Analyses microbiologiques et observations microscopiques .....</i>	<i>24</i>
IV.3.6.	<i>Analyse sensorielle.....</i>	<i>24</i>
<b>V.</b>	<b>PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS.....</b>	<b>25</b>
V.1.	COMPARAISON DES DEUX BRASSAGES.....	25

V.2.	COMPARAISON DES MOUTS .....	26
V.2.1.	<i>Analyse de l'EBC sur le moût</i> .....	26
V.2.2.	<i>Analyse des sédiments</i> .....	26
V.3.	COMPARAISON DES FERMENTATIONS .....	28
V.4.	ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DES DEUX BIERES .....	28
V.4.1.	<i>CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dissous</i> .....	28
V.4.2.	<i>Titre alcoométrique volumique (TAV)</i> .....	29
V.4.3.	<i>Mesure de l'EBC</i> .....	29
V.5.	ANALYSES MICROBIOLOGIQUES.....	30
V.5.1.	<i>Milieu UBA</i> .....	30
V.5.2.	<i>Milieu Lysine additionné de cycloheximide</i> .....	31
V.5.1.	<i>Milieu MRS</i> .....	32
V.6.	ANALYSE SENSORIELLE.....	33
V.7.	BILAN INTERMEDIAIRE DES ANALYSES .....	34
<b>VI.</b>	<b>DISCUSSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>35</b>
VI.1.	RESULTATS.....	35
VI.1.1.	<i>Synthèse des résultats principaux et mise en relation avec la bibliographie</i> .....	35
VI.1.2.	<i>Remise en cause des résultats obtenus et analyses complémentaires</i> .....	35
VI.1.3.	<i>La réduction de l'ébullition, une pratique à adopter ?</i> .....	39
VI.2.	D'AUTRES FAÇONS D'ECONOMISER DE L'ENERGIE .....	42
VI.2.1.	<i>Optimisation de la production : double brassin</i> .....	42
VI.2.2.	<i>Les raw beer : alternative à l'ébullition ?</i> .....	44
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>45</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>47</b>
<b>IX.</b>	<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>52</b>
<b>X.</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>53</b>
<b>XI.</b>	<b>TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>61</b>
<b>XII.</b>	<b>TABLE DES TABLEAUX .....</b>	<b>61</b>
<b>XIII.</b>	<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>63</b>

# I. Introduction

Aujourd'hui, la bière est la troisième boisson la plus consommée après l'eau et le thé (Salanta, et al., 2020). En 2020, la consommation de bière mondiale était approximativement de 177,5 milliards de litres, en baisse de 6,7% par rapport à l'année 2019. Néanmoins, elle demeure la boisson alcoolisée la plus consommée à travers le monde et les pays les plus consommateurs sont la Chine (1<sup>er</sup>), les Etats-Unis (2<sup>ème</sup>) et le Brésil (3<sup>ème</sup>) (Kirin Brewery Company, s.d.).

La France, quant à elle, se place seulement à la 14<sup>ème</sup> position. Contrairement aux autres boissons alcoolisées, la consommation de bière continue d'augmenter en France. Celle-ci est passée de 30 à 33 L/hab/an de 2014 à 2020 (Vazquez, 2021). Même si la majorité des bières consommées en France proviennent de grands groupes brassicoles industriels (Heineken, AB InBev...), la bière artisanale parvient de plus en plus à s'imposer.

En effet, les brasseries artisanales ont connu un grand essor entre 2009 et 2020 où leur nombre est passé de 200 à 2300 brasseries en métropole et dans les départements d'Outre-mer (Brasseurs de France, s.d.). En 2020, la France était le 1<sup>er</sup> pays européen en nombre de brasseries.

La popularité des bières artisanales s'explique par des produits plus variés qui mettent en avant la richesse et la diversité de la culture brassicole française. En effet, les recettes, très variées et en constante innovation cherchent à mettre en avant l'origine des matières premières et parfois les produits du terroir. La brasserie artisanale s'inscrit dans un mode de consommation local (circuit court) qui se préoccupe notamment des problématiques environnementales, ce qui est de plus en plus recherché par le consommateur.

Les principales étapes de fabrication de la bière sont : concassage, empâtage, rinçage des drêches, ébullition, refroidissement, fermentation et conditionnement. Derrière cette volonté de produire de façon locale et à plus petite échelle, le processus de brassage est en réalité très demandeur en énergie. L'étape d'ébullition, d'une durée de 60 minutes en général, est notamment la plus consommatrice. Elle a pour but de stériliser le moût et permet l'ajout de houblon pour l'amertume. Récemment, le conflit russo-ukrainien, a eu comme conséquence l'augmentation du prix du gaz : la Russie alimentant l'Europe à hauteur de 40% de sa consommation totale de gaz. Cela pèse sur la santé financière des microbrasseries chauffant au gaz et qui ne disposent pas toujours des installations les plus performantes en termes d'efficacité énergétique.

Ainsi, le conflit russo-ukrainien et l'aspect environnemental de la fabrication artisanale de bière poussent les microbrasseries à réduire leurs consommations d'énergie. Pour y parvenir, une des solutions serait de modifier les habitudes de fabrication en réduisant la durée d'ébullition. Brewing Theory, agence de conseil spécialisée dans la boisson travaille en collaboration avec les brasseurs et leur propose des solutions pour améliorer leur production. Cette étude s'inscrit dans la démarche d'accompagnement des brasseries. Elle a pour but d'étudier l'impact sur la bière finie d'une réduction de 15 minutes du temps d'ébullition et d'en estimer sa faisabilité pour les brasseurs.

Le déroulement de l'étude va être présenté dans ce rapport en commençant par une présentation de l'entreprise Brewing Theory. Quelques références bibliographiques permettront ensuite de poser le contexte de l'étude et de faire un état de l'art des connaissances sur le processus de brassage de la bière, en particulier l'ébullition et les consommations d'énergies associées. Ensuite, le rapport traitera des différentes expériences réalisées dans le cadre de cette étude avec une attention portée à la méthodologie mise en place puis les résultats de ces expériences. Enfin, une discussion et une conclusion permettront de poser un regard critique sur les résultats obtenus et de faire une synthèse de l'étude.



## II. Brewing Theory, entreprise innovante dans le secteur de la boisson

### II.1. Histoire de l'entreprise

Diplômé de l'école d'ingénieur ISA en 2013 avec une spécialité en R&D (Recherche et Développement) dans le domaine de l'agroalimentaire, Théodore Becquart, passionné par le monde de la bière, rejoint la brasserie Saint Germain en tant qu'ingénieur brasseur. Cette expérience de presque 3 ans lui permettra d'approfondir ses connaissances et d'acquérir des compétences sur le monde brassicole. Elle lui permettra de rejoindre la brasserie Célestin en 2017, initialement située dans le Vieux-Lille, pour participer au développement d'une nouvelle unité de production à Marquette et superviser la production des deux sites. Théodore acquiert alors de nombreuses compétences dans plusieurs domaines (QSE, maintenance, commercialisation...) et de solides connaissances sur le développement de brasserie (Brewing Theory, s.d.).

Dans le même temps, le monde de la brasserie artisanale se développe à très grande vitesse. Les consommateurs sont à la recherche de produits de plus en plus locaux et moins standardisés. De plus en plus de personnes souhaitent vivre de leur passion en créant leur brasserie, en effet, le nombre de microbrasseries explose et passe de 504 à 1 650 de 2013 à 2019 (Gaudiaut, 2021). Ce sont souvent des brasseurs amateurs qui se lancent et qui ne maîtrisent pas forcément le brassage de gros volumes de bière. Face à cet engouement pour la bière artisanale, Théodore, avec la volonté de transmettre sa passion et d'aider les brasseurs dans leur activité, décide de créer Brewing Theory en 2019.

### II.2. Description de l'entreprise et de ses activités

Brewing Theory est une agence de conseil spécialisée dans le domaine de la boisson. Elle propose une multitude de services s'adressant aux brasseurs et professionnels fabriquant des boissons :

- l'accompagnement/conseil ;
- la formation ;
- la création de recette ;
- des analyses microbiologiques et physicochimiques.

Plusieurs services sont proposés par la structure. C'est tout d'abord l'accompagnement, en effet, Brewing Theory accompagne les fabricants de boissons dans leur projet, surtout dans le domaine brassicole. Cela passe par l'accompagnement des nouvelles

brasseries dans le dimensionnement, l'organisation de la production (logistique) et le choix du matériel (cuves de brassage et de fermentation, soutireuse, enfuteuse...).

La deuxième activité est la formation. Une multitude de formations sont proposées aux entreprises, celles-ci permettent de les accompagner lors de leur installation ou tout au long de leur parcours pour se perfectionner. Ces formations peuvent être théoriques et aborder différents sujets que ce soit en brasserie (formation à l'analyse sensorielle, au brassage, au management de la qualité...) ou dans le développement d'autres boissons (formation sur la limonade, formation hard seltzer...). Ces formations peuvent aussi être pratiques car Brewing Theory forme les brasseurs sur leur matériel de production, de la cuve d'empâtage à la soutireuse, leur permettant de gagner du temps.

L'entreprise possède un laboratoire lui permettant de mettre en place une activité de recherche et de développement sur une multitude de boissons, alcoolisées ou non. Ainsi, les fabricants de boissons

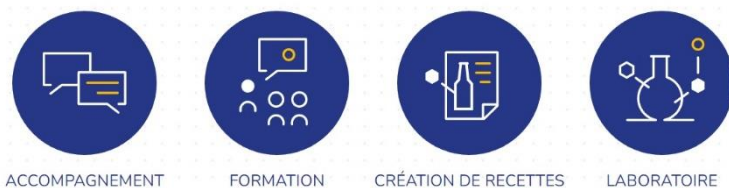


Figure 1 : Les 4 activités de Brewing Theory (source : Brewing Theory)

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

peuvent faire appel à Brewing Theory pour le développement d'une recette, allant de la limonade jusqu'à la bière en passant par le thé glacé, le kombucha, et autres boissons innovantes. L'entreprise travaille également avec d'autres acteurs comme des restaurateurs souhaitant créer une boisson à l'effigie de leur établissement.

Enfin, plus récemment, Brewing Theory a développé son laboratoire d'analyse et propose des analyses microbiologiques (détection de contamination) et physicochimiques (mesure de la couleur et l'amertume, taux d'alcool, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> dissous...) permettant aux fabricants de maîtriser la qualité et la régularité de leur production.

Cette activité est en rapport avec la partie accompagnement puisque Brewing Theory peut organiser des audits chez les brasseries pour les aider à déterminer l'origine d'une infection ou d'une irrégularité dans la production par exemple.

### III. Brassage de la bière : processus, ébullition, consommation d'énergie et contexte géopolitique

#### III.1. Processus de fabrication de la bière

##### III.1.1. Les matières premières de la bière

La bière est fabriquée à partir de quatre ingrédients principaux : de l'eau, du malt, du houblon et de la levure.

L'eau est le composant majeur de la bière, elle constitue 90% du produit et selon son profil minéralogique, elle influera sur la bière sur différents aspects du brassage et de la dégustation.

Le malt est en fait une céréale qui a subi le processus de maltage. Celui-ci vise à provoquer et contrôler le processus de germination d'un grain de céréale, il se déroule en plusieurs étapes. La première est la trempage qui consiste à hydrater le grain pour assurer un taux d'humidité optimal (45%) afin de laisser le germe apparaître (au bout de 30 à 45h) (Soufflet, 2019).

L'étape suivante est la germination pendant laquelle le germe continue de se développer. Elle dure 4 à 5 jours et se déroule dans une atmosphère à température et humidité optimales pour le développement du germe. Cette étape est primordiale pour le brassage puisque c'est à ce moment-là que les enzymes sont actives et dégradent les parois cellulaires du grain donnant accès à l'amidon (Soufflet, 2019).

Cette germination est ensuite stoppée par le touraillage où les grains germés sont chauffés à une température comprise entre 80 et 90°C pendant une durée de deux à quatre heures. Cela permet d'atteindre un taux d'humidité inférieur à 4,5%. Celui-ci est important pour le stockage du malt et la désactivation des enzymes nécessaires plus tard dans la fabrication de la bière (Soufflet, 2019). Le malt peut ensuite être torréfié à une intensité plus ou moins forte pour conférer des saveurs diverses : caramel, café, chocolat...

Ainsi, selon la céréale employée, différents types de malt sont obtenus : d'orge (le plus couramment utilisé), de froment, d'avoine, de seigle...

Le houblon utilisé en brasserie est la fleur issue de la plante *Humulus lupulus*. Cette fleur se récolte sur le pied femelle de houblon et se présente sous forme de cône. Ces cônes contiennent une substance appelée lupuline qui se présente sous forme de glandes jaunes. Celle-ci apporte à la bière de l'amertume grâce aux acides alphas qu'elle contient et des arômes/saveurs grâce aux différentes huiles essentielles. Le houblon peut être utilisé sous plusieurs formes :

- sa forme fraîche (juste après récolte) ;
- sous forme de cône séché ;
- sous forme de pellet : les houblons sont débarrassés des tiges et des débris végétaux pour être comprimés sous forme de pellets. Cette forme de houblon est plus pratique en termes de stockage et d'utilisation.



Figure 2 : Coupe de cône de houblon frais (source : BtoBeer)



Figure 3 : Houblon en pellet (source : Hopenhoublon)

Enfin, le dernier composant est la levure, un microorganisme unicellulaire faisant partie du règne des champignons (fungi) (Lesaffre, 2020). Ce microorganisme est capable de réaliser le processus de fermentation alcoolique c'est-à-dire la transformation des sucres en alcool et en dioxyde de carbone en l'absence d'oxygène. En brasserie, plusieurs souches de levure peuvent être utilisées dont *Saccharomyces cerevisiae* majoritairement (fermentation haute<sup>1</sup>) ou encore *Saccharomyces pastorianus* (fermentation basse<sup>2</sup>). D'autres souches existent et certaines fermentations peuvent être réalisées par des bactéries sauvages pour des styles plus spécifiques tels que le lambic. La levure peut être utilisée sous forme sèche ou sous forme liquide pour le brassage de la bière. Les brasseries peuvent aussi réutiliser leur levure d'un brassin<sup>3</sup> à un autre.

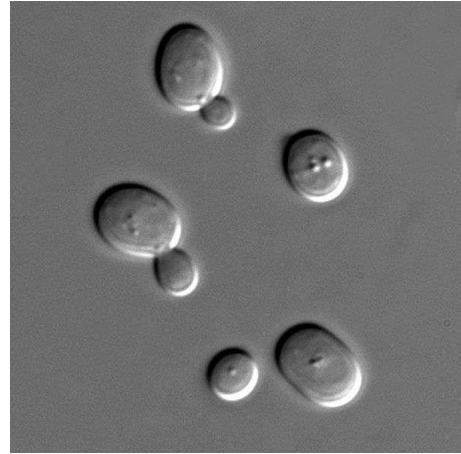


Figure 4 : *Saccharomyces cerevisiae* (source : Futura sciences)

### III.1.2. Du concassage à l'empâtage

La première étape de la fabrication de la bière est l'empâtage : le malt de céréale est mélangé dans une cuve avec de l'eau chaude formant ce qui est appelé la maïsche afin d'en extraire les sucres. Au préalable, le malt est concassé pour permettre aux enzymes<sup>4</sup> d'accéder à l'amidon contenu dans les grains.

En effet, durant l'empâtage, un processus enzymatique d'amylolyse a lieu : les molécules d'amidon (sucre complexe composé de centaines d'unités de glucose) sont dégradées en sucres plus petits, consommables par la levure. Cette action enzymatique se fait principalement sous l'effet de deux enzymes amylose<sup>5</sup> :

- la Bêta-amylose : elle dégrade les chaînes d'amidon par l'extrémité produisant le maltose, un sucre simple fermentescible par la levure (Green, 2008) ;
- l'alpha amylose : elle dégrade les chaînes d'amidon à des endroits aléatoires et crée des sucres non fermentescibles qui ne seront pas consommés par la levure lors de la fermentation (Green, 2008).

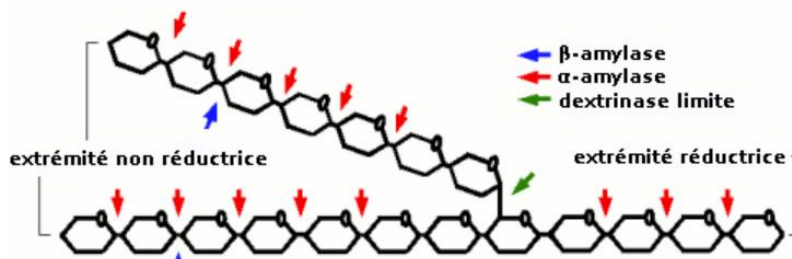


Figure 5 : Dégradation de l'amidon par les amyloses (Univers bière)

Cette réaction enzymatique va dépendre de plusieurs paramètres tels que la durée de l'empâtage (60 min en général), la température (entre 61 et 71°C généralement) et le pH<sup>6</sup> de la maïsche ainsi que la quantité d'eau par rapport au grain appelé ratio eau/malt (entre 2 et 3 L d'eau/kg malt).

A la fin de l'empâtage, un « mash-out » peut être réalisé : la température de la maïsche est augmentée pendant dix minutes à une température comprise entre 75 et 78°C pour dénaturer les enzymes et figer

<sup>1</sup> Type de fermentation dans laquelle les levures se trouvent à la surface du moût et se déroulant généralement à une température comprise entre 18 et 25°C

<sup>2</sup> Type de fermentation se déroulant généralement à une température comprise entre 10 et 15°C

<sup>3</sup> Cuve où l'on brasse la bière ; son contenu

<sup>4</sup> Protéine accélérant les réactions chimiques, ici la dégradation de l'amidon

<sup>5</sup> Enzyme intervenant dans la dégradation de l'amidon

<sup>6</sup> Potentiel hydrogène : il mesure l'état acido-basique d'une solution contenant des ions H+

le profil de sucres du moût<sup>7</sup>. Enfin, un rinçage des drêches (malt issu de l'empâtage) à l'eau chaude est effectué pour récupérer les derniers sucres présents dans les céréales. Le moût est alors transféré dans une autre cuve pour l'ébullition.

### III.1.3. L'ébullition

L'ébullition est l'étape durant laquelle le moût est bouilli pendant une durée d'une heure. Cette étape a plusieurs rôles (Fix, 2000) :

- la stérilisation du moût ;
- l'addition de houblon pour l'amertume ;
- l'évaporation de composés indésirables responsables de faux-goûts dans la bière ;
- la coagulation des protéines issues du malt ;
- la désactivation des enzymes issues de l'empâtage ;
- la concentration du moût par évaporation ;
- le développement de la couleur et de certaines saveurs.

Ces différents processus seront approfondis dans la suite de l'étude.

Après l'ébullition, le moût subit une étape de whirlpool : un tourbillon est créé dans la cuve permettant de précipiter les matières en suspension (protéines, particules de malt et de houblon restantes) au fond de la cuve en son centre. Cela permet de clarifier le moût et de le débarrasser de la plupart des particules. Le moût est ensuite refroidi à la température d'ensemencement de la levure puis transféré en cuve de fermentation.

### III.1.4. La fermentation

Une fois le moût refroidi dans la cuve de fermentation, la levure estensemencée. De la levure sous forme sèche ou liquide est directement incorporée dans le moût, c'est le début de la phase de fermentation alcoolique. Durant cette étape, la levure va consommer les sucres présents dans le moût issus de l'empâtage, ces sucres sont le glucose, le maltose (2 unités de glucose), le maltotriose (3 unités de glucose). Il y a également des sucres complexes comme les dextrines, composées de plus de 3 unités de glucose et non fermentescibles (Fermentis).

La fermentation se déroule en plusieurs phases distinctes :

- la phase d'adaptation : juste après ensemencement, la levure s'adapte aux conditions du moût dans lequel elle se trouve. Elle utilise l'oxygène dissous, les acides aminés<sup>8</sup>, ses réserves en glycogène<sup>9</sup> et les autres nutriments pour synthétiser des stérols<sup>10</sup> nécessaires à la construction de la membrane cellulaire. Cette dernière est primordiale, car perméable, elle permet l'absorption des sucres et de l'azote pour ensuite les métaboliser (Palmer, 2017) ;
- la phase primaire : elle débute généralement 12 heures après ensemencement. Elle est caractérisée par une forte activité de la levure. En effet, la majorité des sucres sont consommés en 2 à 6 jours pour les bières de fermentation haute. Durant cette phase, beaucoup de CO<sub>2</sub> va être créée, ainsi que de l'éthanol et beaucoup de sous-produits, dont certains responsables de faux-goûts (pomme verte, beurre...) (Palmer, 2017) ;
- la phase secondaire ou de conditionnement : après la fermentation primaire, la levure a métabolisé la plupart des sucres facilement fermentescibles. Une majorité des cellules de levures se mettent en dormance mais certaines restent actives et dégradent les derniers sucres, notamment les maltotrioses. Il s'agit aussi d'une phase de réabsorption des sous-produits créés durant la fermentation primaire (Palmer, 2017).

---

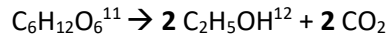
<sup>7</sup> Jus obtenu en salle de brassage avant fermentation, on parle de moût dès l'étape d'empâtage

<sup>8</sup> Acide organique constituant l'unité de structure des protéines

<sup>9</sup> Glucide constitué de très longues chaînes ramifiées de glucose

<sup>10</sup> Alcool polycyclique dans lequel se trouvent le cholestérol, les vitamines D et les stéroïdes

La fermentation alcoolique peut être résumée par l'équation bilan suivante (Penot, 2021) :



En dehors de l'éthanol et du  $\text{CO}_2$ , la fermentation va produire d'autres molécules intéressantes au niveau aromatique comme les esters (arômes fruités) et les phénols (notes de clou de girofle, épices...).

### III.1.5. Le conditionnement

Après fermentation, une période de garde de quelques jours est réalisée sur la bière à faible température, en général inférieure à  $5^\circ\text{C}$  pour faire sédimenter la levure, clarifier la bière et affiner ses arômes. Après la garde, la bière n'est pas pétillante. Pour la gazéifier, deux méthodes existent :

- la refermentation en bouteille : une certaine quantité de sucre est ajoutée à la bière avant embouteillage et éventuellement de la levure fraîche. La levure va alors fermenter ce sucre et produire du dioxyde de carbone, désormais enfermé dans la bouteille : la bière devient pétillante ;
- carbonatation par ajout de  $\text{CO}_2$  : du dioxyde de carbone est directement injecté dans la bière froide dans la cuve de garde via une pierre en acier inoxydable frittée

La quantité de  $\text{CO}_2$  dans une bière est généralement comprise entre 4 à  $6 \text{ gCO}_2/\text{L}$  (Btobeer, 2018)

### III.1.6. Point sur la densité en brasserie

Pour suivre l'avancée du brassage et de la fermentation, les brasseurs effectuent régulièrement des mesures de densité. Les unités utilisées sont le degré plato ( $^\circ\text{P}^{13}$ ) ou la densité spécifique<sup>14</sup> (sans unité). En brasserie, la densité de la bière ou du moût représente la quantité de sucre dissous dans cette même bière/moût.

Autrement dit, lors de la fermentation, la densité du moût qui se transforme en bière, diminue peu à peu : les sucres sont transformés en éthanol et donc la bière est de moins en moins chargée en sucres.

Plusieurs mesures de densité sont prises lors du brassage : à la fin de l'empâtage pour déterminer la quantité de sucre extraite du malt, à la fin de l'ébullition (juste avant fermentation) et après fermentation.

Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres mesures peuvent être prises au cours du processus, notamment pour suivre l'avancée de la dégradation des sucres lors de la fermentation.

Les densités prises avant et après fermentation permettent de calculer le taux d'alcool de la bière. A partir de cela, il est possible de déterminer l'atténuation de la levure, il s'agit du pourcentage d'extrait (de sucre) qui a été consommé par la levure en comparant la densité pré et post-fermentation (Fermentis).



Figure 6 : Prise de densité avec un densimètre (Bellenguez M. 2020)

<sup>11</sup> Formule brute de la molécule de glucose

<sup>12</sup> Formule brute de la molécule d'éthanol

<sup>13</sup> Le degré plato est une unité de mesure permettant d'exprimer le pourcentage en masse d'extrait sec du moût

<sup>14</sup> La densité spécifique d'un produit est le rapport entre sa masse volumique et celle de l'eau

## III.2. Les processus biochimiques mis en jeu durant l'ébullition du moût

Comme indiqué précédemment, l'ébullition du moût a plusieurs effets bénéfiques sur la bière. Ces différents effets vont être approfondis dans la partie ci-dessous.

### III.2.1. Stérilisation du moût

Le moût venant de l'empâtage contient encore beaucoup de microorganismes comme des bactéries ou des levures sauvages provenant du malt par exemple. L'un des premiers bénéfices de l'ébullition est la stérilisation, en effet, à la température de 100°C, la stérilisation ne prend que quelques minutes et permet la destruction de toutes les bactéries, levures et moisissures présentes dans le moût (Collin & De Clerck, 2022).

### III.2.2. Coagulation des protéines et amélioration de la stabilité colloïdale

Avant ébullition, le moût contient beaucoup d'azote, présent dans les protéines. L'étape d'ébullition va permettre la coagulation de celles-ci permettant d'obtenir une meilleure stabilité colloïdale<sup>15</sup> : dans la bière, les protéines en suspension peuvent former un trouble.

A 100°C, les protéines se dénaturent et perdent leur conformation<sup>16</sup> dans l'espace leur permettant de s'agréger entre elles sous forme de flocons. Ce phénomène est appelé la cassure à chaud. La précipitation des protéines dépend de plusieurs paramètres : le pH, la vigueur, la température et la durée d'ébullition (Collin & De Clerck, 2022).

En effet, le pH affecte fortement la coagulation : les protéines sont des composés amphotères<sup>17</sup> et sont plus susceptibles de précipiter à un pH voisin de leur point isoélectrique<sup>18</sup> (Collin & De Clerck, 2022).

La coagulation va aussi dépendre de la quantité de protéines apportées par le malt et la nature de celles-ci. Un grain malté apportera des protéines de type albumines et globulines facilement coagulables ainsi que des polypeptides résultant de l'hydrolyse enzymatique s'opérant durant le brassage et le maltage. Les grains crus apporteront très peu de protéines modifiées par le maltage et sont susceptibles de créer des bières plus troubles (Collin & De Clerck, 2022).

Les polyphénols<sup>19</sup> provenant du malt (dans l'écorce du grain notamment) et du houblon constituent 20% de la cassure à chaud. En effet, ceux-ci se combinent avec les matières azotées du moût et les précipitent. En général, la quantité d'azote coagulée est en moyenne de 5 à 6% de l'azote total du moût (Collin & De Clerck, 2022).

### III.2.3. Dénaturation des enzymes

A l'instar des protéines précipitant durant l'ébullition, les enzymes de l'empâtage sont elles aussi des protéines qui perdent leur conformation à haute température. En perdant leur forme tridimensionnelle, elles sont désactivées, elles ne dégradent plus l'amidon et le profil de sucres du moût est figé. Cette dénaturation des enzymes par l'ébullition agit en complément du mash-out.

---

<sup>15</sup> Capacité d'une bière à rester limpide au fil du temps

<sup>16</sup> Disposition tridimensionnelle des atomes ou radicaux fixés sur des atomes liés entre eux par une ou plusieurs liaisons chimiques

<sup>17</sup> Un composé amphotère est un composé qui peut à la fois capturer ou donner un ou plusieurs protons (ion H<sup>+</sup>)

<sup>18</sup> Le point isoélectrique désigne le pH auquel les protéines sont neutres : pas de charges négatives ni positives

<sup>19</sup> Groupe de molécules ayant plus d'un groupe phénolique

### III.2.4. Dissolution et transformation des composés du houblon

#### III.2.4.1. Isomérisation des résines amères

L'amertume de la bière est mesurée par l'IBU (International Bitterness Unit). Les composés du houblon responsables de l'amertume sont les acides alpha. Sous leur forme initiale dans le houblon, ils sont insolubles dans le moût. C'est l'ébullition qui va provoquer l'isomérisation<sup>20</sup> de ces composés les rendant soluble et leur permettant d'apporter l'amertume à la bière. L'isomérisation débute à une température d'environ 70°C.

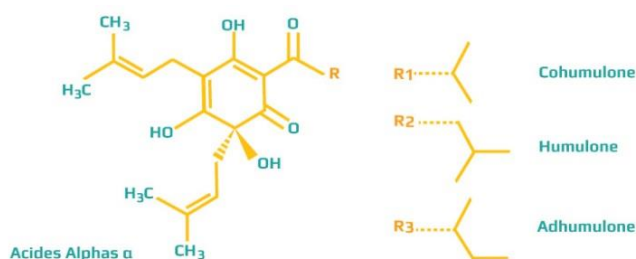


Figure 7 : Les acides iso alpha (BtoBeer, 2017)

Ces trois acides alpha sont : les n-humulones, les co-humulones et les ad-humulones. De ces trois molécules sont obtenus par isomérisation 3 nouveaux composés : les iso-n-humulones, isocohumulones et isoadhumulones (Collin & De Clerck, 2022), (annexe 1, page 53).

Ces 3 composés isomérisés peuvent être présent sous 2 formes -cis ou -trans, les formes -trans étant beaucoup moins stables dans le temps générant des pertes significatives d'amertume lors du vieillissement.

Chaque iso-acide alpha va apporter une intensité d'amertume qui lui est propre : la n-humulone (35 à 70%) donne une amertume douce, la cohumulone (20 à 65%) apporte une amertume dure et l'adhumulone (10 à 15%) une amertume faible (Btobeer, 2017).

Les paramètres déterminant l'amertume apportée par les acides alpha sont multiples. Premièrement, la teneur en acide alpha (en %) du houblon utilisé. Pour une même quantité, plus un houblon est concentré en acide alpha plus il apportera d'amertume.

La température, le temps et le pH de l'ébullition influenceront l'extraction d'amertume. Plus l'ébullition est longue et franche, plus l'extraction d'amertume sera grande. Cependant, à l'approche des 100°C, le taux d'isomérisation diminue d'environ 60% et après 90 à 120 minutes d'ébullition, le rendement d'isomérisation atteint souvent un plateau (Collin & De Clerck, 2022).

Le temps d'ébullition peut également influencer la perception de l'amertume. En effet, une expérience a été réalisée en 1995 pour analyser la composition en isocohumulone de deux bières. Deux méthodes d'houblonnage distinctes pour une même recette, un même houblon et un même processus de brassage ont été étudiées. Dans l'une des deux recettes, le houblon avait été ajouté en FWH (First Wort Hopping)<sup>21</sup> et dans l'autre à la fin de l'ébullition. Les résultats ont montré qu'un houblonnage en FWH donnait un taux d'isocohumulone (amertume dure) 20% inférieur à un houblonnage en fin d'ébullition (Collin & De Clerck, 2022).

Le temps d'ébullition peut alors être une variable en ce qui concerne la nature de l'amertume.

Les acides alpha contribuent également à la stabilité de la bière par leur pouvoir antiseptique et sont responsables d'une bonne tenue de mousse. D'autres substances comme les acides Beta, les polyphénols, les sulfates influencent l'amertume dans la bière (Collin & De Clerck, 2022).

<sup>20</sup> Changement de structure d'une molécule conservant la même composition atomique

<sup>21</sup> Méthode d'houblonnage consistant à ajouter le houblon dans le moût chaud (70-80°C), une fois transféré en cuve d'ébullition, durant l'étape de rinçage des drèches



### III.2.4.2. Utilisation des composés aromatiques du houblon

En dehors des acides alpha, les houblons contiennent une grande quantité d'huiles essentielles très volatiles. Il a été montré que 7 minutes d'ébullition suffisent pour perdre la majorité d'entre elles (Collin & De Clerck, 2022), c'est pourquoi les houblons aromatiques sont ajoutés en fin d'ébullition voire durant l'étape de whirlpool à plus faible température.

### III.2.4.3. Ajout d'épices ou de plantes aromatiques

De même que pour les houblons, certaines épices sont ajoutées au moût et servent à parfumer la bière.

### III.2.5. Elimination du diméthylsulfure (DMS)

Le sulfure de diméthyle est un composé organosulfuré retrouvé dans la bière. Il se caractérise par un goût et une odeur de maïs cuit, de chou ou encore de betterave (Alpha bière, 2018)

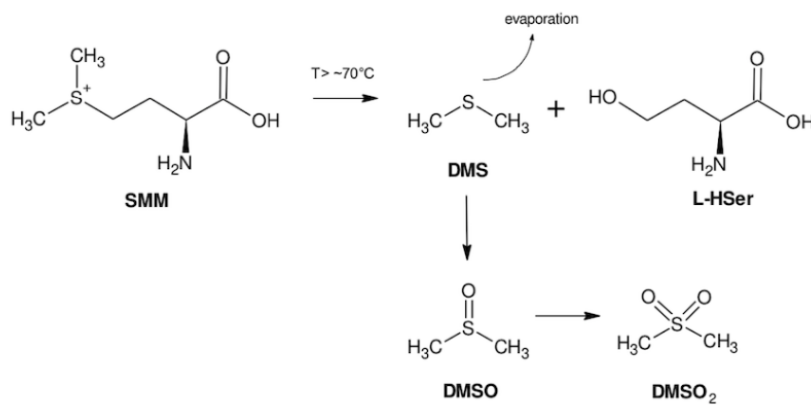


Figure 8 : Formation du DMS à partir de SMM (Redders.T)

Le DMS se forme à partir de la décomposition d'un acide aminé, le S-méthylméthionine (SMM) à partir de l'empâtage jusqu'au refroidissement de la bière. Cet acide aminé est issu du malt et se forme lors de la germination de l'orge pendant l'opération de maltage, il se retrouve souvent en grande quantité dans les malts clairs (Bamforth, 2013).

Heureusement, le DMS est un composé volatil (point d'ébullition à 38°C) et la majorité du DMS formé est évaporé lors de l'ébullition. Il a été déterminé que le temps de demi-vie du SMM à la température d'ébullition est de 37 minutes, signifiant que 37 minutes d'ébullition sont nécessaires pour évaporer la moitié du DMS venant du SMM. Une ébullition de 90 minutes permet seulement d'évaporer  $\frac{3}{4}$  du DMS et seulement une ébullition de deux heures permet d'éliminer la plus grande partie du DMS (Collin & De Clerck, 2022). Le temps de demi-vie du SMM est plus grand quand la température baisse. Ainsi, le temps et la vigueur de l'ébullition sont deux facteurs très importants dans l'élimination du DMS.

Une autre étape critique du processus de brassage est la clarification par le whirlpool. Durant cette étape, le moût est encore chaud, du DMS se forme encore mais n'est plus évaporé car le moût n'est plus en ébullition. La clarification doit alors être la plus courte possible.

Durant la fermentation, la levure peut aussi réduire un autre précurseur du DMS : le diméthylsulfoxyde (DMSO), produit durant le maltage et laissant donc encore plus de DMS dans la bière finie. Cela dépend des souches de levure et est souvent un signe de contamination par un autre microorganisme (Bamforth, 2013).

### III.2.6. Réaction de Maillard et développement de la couleur

La réaction de Maillard est une réaction très complexe dont résultent des composés aromatiques et/ou colorés qui font suite à la réaction entre les sucres réducteurs et les acides aminés ou peptides. Cette réaction se déroule lors de la montée en température, généralement à partir de 100°C. Elle peut être visualisée par le brunissement du moût dû à la formation de composés appelés mélanoidines (Brewers journal, 2017) (annexe 2, page 54).

De nombreux arômes sont également synthétisés : furanéol, maltol, isomaltol... De plus, les aldéhydes de Strecker et les pyrazines sont formés, aux odeurs caractéristiques (Brewers journal, 2017). Selon les acides aminés présents en début de réaction, plusieurs aldéhydes sont formés avec des caractéristiques sensorielles différentes :

Tableau 1 : Acide aminé, aldéhydes de strecker formés et arômes associés durant la réaction de Maillard (Brewersjournal, 2017)

Acide aminé de départ	Aldéhyde de Strecker formé	Odeur
Valine	2-méthylpropanal	Végétale, fruit mûr
Leucine	3-méthylbutanal	Malté, fruité, pain grillé
Isoleucine	2-méthylbutanal	Fruité, sucré, grillé
Phénylalanine	Phénylacétaldéhyde	Végétale, florale, jacinthe
Méthionine	Methional, methanethiol, 2-propénal	Légumes
Proline	Pyrrolidine, 1-pyrroline	Intermédiaire pour la synthèse de composé à l'odeur de pain
Cystéine	Mercaptoacétaldéhyde, acétaldéhyde, sulfure d'hydrogène, ammoniac	Intermédiaire pour la synthèse de composé à l'odeur de viande

### III.2.7. Réduction du temps d'ébullition : les potentiels impacts

Ainsi, en étudiant les différents processus biochimiques qui se déroulent pendant l'ébullition, il est possible d'estimer quels paramètres de la bière finale seront affectés par la réduction du temps d'ébullition. En effet, celle-ci semble jouer un rôle dans :

- la transparence de la bière car elle permet la coagulation des protéines ;
- la perception et la nature de l'amertume ;
- la couleur de la bière ainsi que certains arômes grâce à la réaction de Maillard ;
- l'évaporation du DMS, responsable de faux-goût ;
- le taux d'alcool final de la bière.

Ces premiers paramètres serviront de base d'étude pour les analyses mises en place par la suite.

## III.3. Contexte géopolitique et influence sur le monde brassicole

### III.3.1. Une crise des matières premières et de l'énergie

Depuis le 24 février 2022, la Russie est en guerre contre l'Ukraine (Le Parisien, 2022). Ce conflit qui touche d'abord la population ukrainienne a aussi de lourdes conséquences sur l'économie mondiale.

Pourtant, la Russie et l'Ukraine jouent un rôle direct modeste dans l'économie mondiale. Elles ne représentent qu'environ 2% du PIB mondial aux prix du marché et une proportion identique du commerce mondial total : les deux pays ont des échanges limités avec le reste du monde. De plus, les

stocks d'investissement direct étranger (IDE) en Russie et les IDE Russe dans les économies d'autres pays ne représentent qu'entre 1 et 1,5% du total mondial (OCDE, 2022).

Cependant, la Russie et l'Ukraine sont deux gros fournisseurs de matières premières dans le monde et exercent une influence importante sur ce marché. En effet, la Russie et l'Ukraine représentent environ 30% des exportations mondiales de blé, 20% pour le maïs, les engrais minéraux et le gaz naturel, 11% pour le pétrole (OCDE, 2022). De plus, la Russie est un fournisseur majeur de palladium et de nickel, utilisés dans l'industrie automobile notamment. La Russie et l'Ukraine sont également source de gaz rares (argon, néon) utilisés dans l'industrie aéronautique. Sans parler des réserves importantes à l'échelle mondiale d'uranium de ces deux pays (OCDE, 2022). Ainsi, le conflit russo-ukrainien a d'importantes conséquences sur le prix des matières premières de plusieurs domaines notamment l'agriculture et l'industrie. Le prix de ces nombreuses matières premières a fortement augmenté depuis le début du conflit.

Variation en % par rapport à la moyenne de janv. 2022

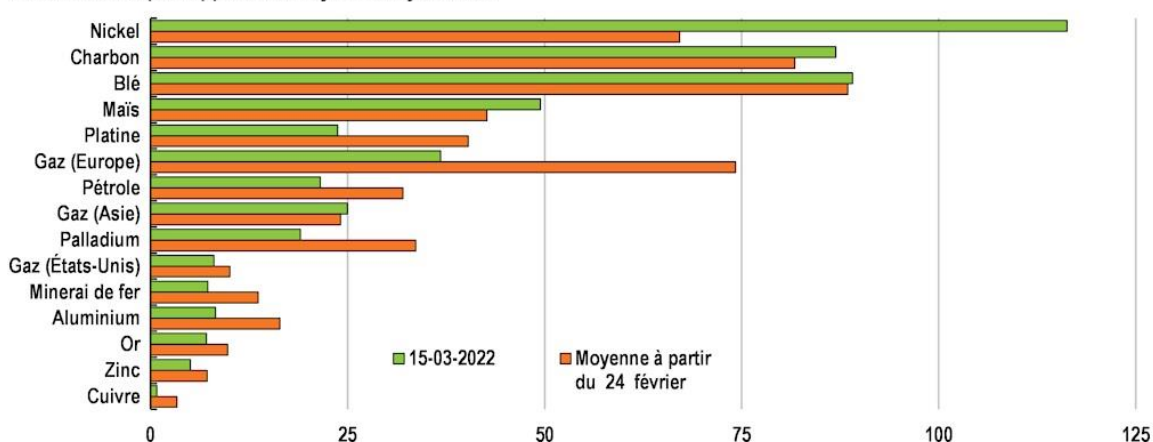


Figure 9 : Evolution du prix des principales matières premières exportées par la Russie et l'Ukraine (OCDE, 2022)

Comme le montre la figure 9 ci-dessus, qui donne la variation du prix de certaines matières premières par rapport à janvier 2022. Le prix en moyenne depuis le début du conflit a énormément augmenté, notamment pour le gaz en Europe, le blé, le charbon et le nickel. C'est aussi le cas du pétrole, résultant d'une forte hausse du prix des carburants. Ces augmentations ont des conséquences inflationnistes avec notamment la baisse du pouvoir d'achat de la population européenne. Cela a aussi un impact sur les coûts de production de la quasi-totalité des entreprises notamment agricoles, forestières ou agroalimentaires.

### III.3.2. Focus sur le gaz

En Europe, 40% du gaz consommé vient de la Russie et 24% pour la France, l'Europe est donc très touchée par ce conflit. Cela crée des tensions sur le marché du gaz. Comme l'indique le graphique de la figure 10, le prix du gaz français (PEG) pour livraison va continuer d'augmenter : le PEG au 1<sup>er</sup> trimestre 2023 a notamment augmenté de 64% entre le 13 juin et le 15 juillet 2022 passant de 85€/MWh<sup>22</sup> à 139€/MWh (Commission de régulation de l'énergie, 2022).

<sup>22</sup> Megawatt-heure

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

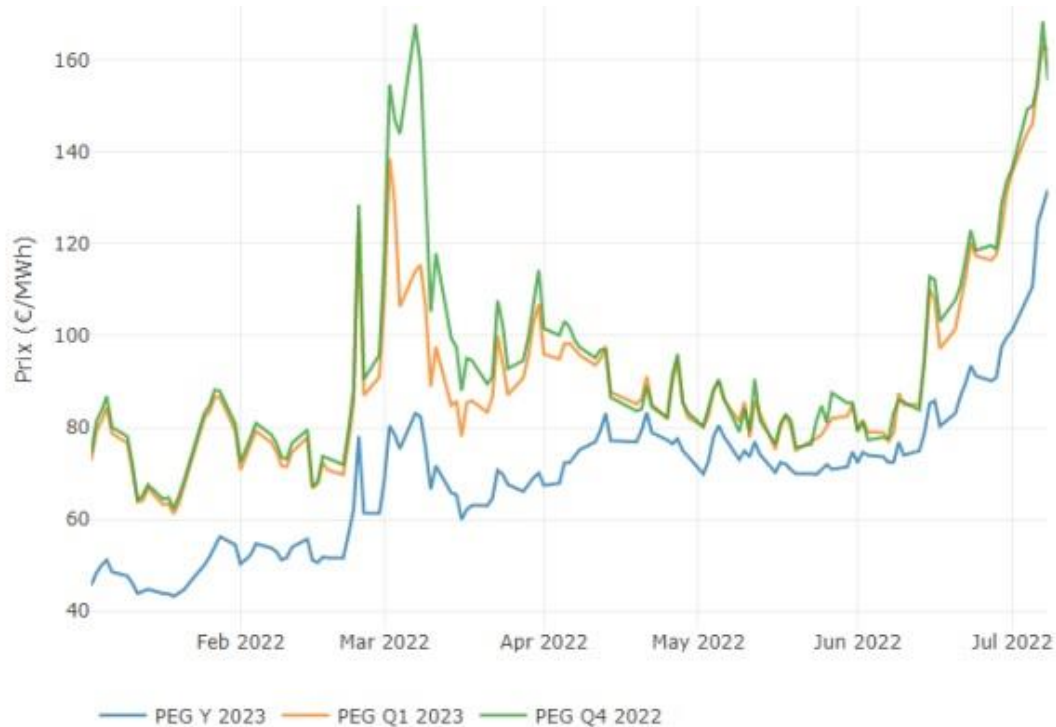


Figure 10 : Evolution des prix du gaz français (PEG) pour les trimestres d'hiver 2022-2023 et pour l'annuel 2023 (Commission de régulation de l'énergie, 2022)

En juillet 2022, les prévisions estimaient plusieurs valeurs de prix du gaz :

- 160€/MWh pour la fin d'année 2022 (PEG Q4 2022) et le premier trimestre de 2023 (PEG Q1 2023)
- 130€/MWh pour l'année 2023 (PEG Y 2023)

Ces prix sont très hauts en sachant qu'avant février 2022, le prix du gaz livré en 2023 était estimé à moins de 50€/MWh. L'allure du graphique illustre bien les fluctuations et la forte augmentation.

C'est pourquoi les pays européens ont convenu d'une réduction de la demande de gaz globale de 15% à partir d'août 2022 jusque mars 2023 (Conseil de l'union européenne, 2022). Face à cette réduction de la consommation et à la continuelle augmentation du prix gaz pour la fin 2022 et l'année 2023, les industries françaises de tout type vont devoir mettre en place des mesures de réduction de consommation d'énergie.

Dans le cadre de cette étude, un focus est réalisé sur la réduction de la consommation d'énergie en industrie agroalimentaire, plus particulièrement en brasserie. Cette réduction se traduit par une modification du processus de brassage : la réduction de 15 minutes de la durée d'ébullition habituelle de 60 minutes. Afin de mieux comprendre les enjeux de cette réduction, la consommation d'énergie du processus de brassage est étudiée.

### III.4. Consommation d'énergie en brasserie

#### III.4.1. Répartition des consommations d'énergie

Action	Consommation d'énergie (kWh <sup>23</sup> /hl <sup>24</sup> )	Pourcentage de la consommation d'énergie totale (%)
<b>Empâtage</b>	2,21	19,8
<b>Chauffage de 74 à 99°C</b>	3,38	30,2
<b>Ebullition 1 heure (taux évaporation 7,5%)</b>	5,03	45
<b>CIP (nettoyage)</b>	0,28	2,5
<b>Eau chaude</b>	0,28	2,5
<b>Total</b>	11,18	100

Tableau 2 : Consommation d'énergie des différentes étapes du processus de brassage (Scheller et al., 2008)

Ce tableau reprend les consommations d'énergie en kWh/hl des différentes étapes du brassage de l'empâtage jusqu'au CIP<sup>25</sup>. Le poste le plus consommateur d'énergie est l'ébullition avec 45% de la consommation d'énergie totale. Il constitue donc un gros poste pour réduire la consommation d'énergie durant le brassage.

#### III.4.2. Consommation d'énergie durant une ébullition de 60 minutes

Pour calculer la consommation d'énergie nécessaire à l'ébullition d'un moût pendant 60 minutes, la cuve d'ébullition avec les dimensions suivantes est considérée :

- capacité totale : 40 hl soit 4000 l soit 4 m<sup>3</sup> ;
- diamètre interne = 1,8 m ;
- diamètre externe = 2 m ;
- hauteur = 1,57 m ;
- épaisseur de la paroi = 100 mm constituée d'un isolant de 100 mm d'épais en laine de roche haute densité entre deux couches d'inox.

Pour les calculs, plusieurs hypothèses sont posées :

- Pour faciliter les calculs, la cuve, normalement cylindrique en haut et en bas, est considérée comme étant un cylindre de 1,57 m de hauteur. Les dimensions des diamètres interne et externe sont conservées ainsi que l'épaisseur de la paroi ;

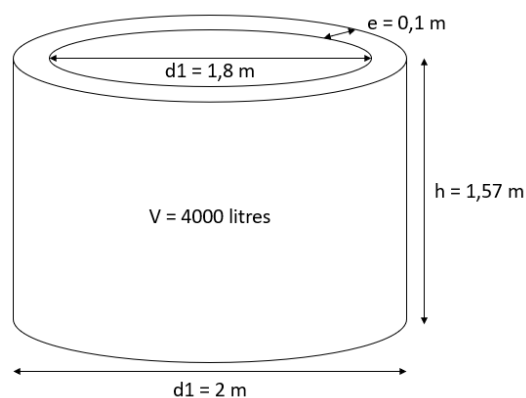


Figure 11 : Dimensions de la cuve de brassage (Bellenguez.M, 2022)

<sup>23</sup> Kilowatt-heure

<sup>24</sup> Hectolitre

<sup>25</sup> Clean In Place : système de nettoyage automatique des cuves de brassage sans démontage de celles-ci

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

- La température du moût bouillant est considérée égale à 100°C et celle du local dans lequel se trouve la cuve à 15°C ;
- La cuve se trouvant dans une salle de brassage, les pertes de chaleur par convection sont négligées. Cependant les pertes de chaleur latérales et haut/bas sont considérées ;
- La paroi de la cuve est considérée comme étant monocouche uniquement constituée de laine de roche ;
- Le taux d'évaporation de la cuve est égal à 7,5% pour un brassin de 2000 litres et un temps d'ébullition de 60 minutes.

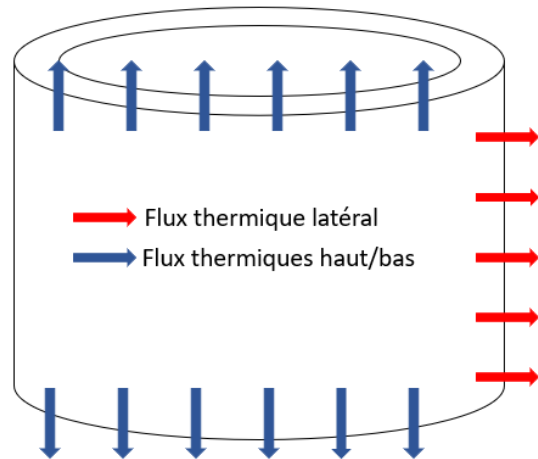


Figure 12 : Représentation des flux thermiques de la cuve lors de l'ébullition (Bellenguez.M, 2022)

### Energie nécessaire à l'évaporation de l'eau

La perte d'eau par évaporation durant une ébullition de 60 minutes avec un taux d'évaporation égal à 7,5% et un volume final de 2000 litres est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Pertes d'eau par évaporation} &= V_{\text{final}} \times \frac{\text{taux}_{\text{évaporation}}}{100} \\ \text{Pertes d'eau par évaporation} &= 2000 \times \frac{7,5}{100} \\ \text{Pertes d'eau par évaporation} &= 150 \text{ l} \end{aligned}$$

Où :

- $V_{\text{final}}$  = Volume de moût après ébullition (l)
- $\text{Taux}_{\text{évaporation}}$  = taux d'évaporation pour le temps d'ébullition considéré (%)

Ainsi les pertes d'eau par évaporation de l'installation sont égales à 150 l/h d'ébullition.

Calculer l'énergie nécessaire pour une ébullition de 60 minutes avec les paramètres cités ci-dessus revient à calculer l'énergie nécessaire pour faire évaporer 150 l soit 150 kg d'eau.

L'équation permettant de calculer l'énergie nécessaire pour évaporer une certaine masse d'eau est la suivante :

$$Q = m_e \times L$$

Où :

- Q = énergie (kJ)
- $m_e$  = masse d'eau à évaporer (kg)
- L = Chaleur latente de l'eau égale à 2250 kJ.kg<sup>-1</sup>

Ainsi l'énergie nécessaire pour évaporer 150 kg d'eau est :

$$Q_1 = 150 \times 2250 = 337\,500 \text{ kJ}$$

Conversion en kWh :

$$Q_1 = \frac{337\,500}{3600} = 93,8 \text{ kWh}$$

### Calcul des pertes de chaleur latérales par conduction

Les pertes de chaleur latérales sont, par raison de symétrie, radiales. Ce sont celles qui se font par les côtés du cylindre, elles se modélisent par l'équation suivante (Loi de Fourier) :

$$\phi_1 = \frac{\lambda \times 2 \times \pi \times h \times (\theta_2 - \theta_1)}{\ln \frac{d_1}{d_2}}$$

Où :

- $\phi_1$  = flux thermique latéral (W)
- $\lambda$  = conductivité thermique de la laine de roche ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
- $h$  = hauteur de la cuve (m)
- $\theta_2$  = température du moût ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta_1$  = température de la salle de brassage ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $d_1$  = diamètre intérieur de la cuve (m)
- $d_2$  = diamètre extérieur de la cuve (m)

La conductivité thermique de la laine de roche varie de  $0,034 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à  $0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la valeur de  $0,040 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  est prise. La température de la salle de brassage est considérée égale à  $15^{\circ}\text{C}$ .

$$\phi_1 = \frac{0,04 \times 2 \times \pi \times 1,57(100 - 15)}{\ln \frac{2}{1,8}} = 318,33 \text{ W}$$

Ainsi, pour une ébullition de 1h (3600 secondes), l'énergie dissipée sous forme de chaleur est égale à :

$$Q_2 = \frac{318,33 \times 3600}{1000} = 1145,99 \text{ kJ}$$

### Calcul des pertes de chaleur par conduction par le bas et le haut de la cuve

En plus des pertes de chaleur latérales du cylindre, il existe des pertes par le haut et par le bas. Celles-ci sont modélisées par l'équation suivante donnée par la loi de Fourier :

$$\phi_2 = \frac{\lambda \times S}{e} \times (\theta_1 - \theta_2)$$

Où :

- $\phi_2$  = flux thermique traversant la section S de la cuve (W)
- $\lambda$  = conductivité thermique de la laine de roche ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
- $S$  = Section de la cuve ( $\text{m}^2$ )
- $e$  = épaisseur de la cuve (m)
- $\theta_1$  = température du moût ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta_2$  = température de la salle de brassage ( $^{\circ}\text{C}$ )

La section de la cuve est égale à  $S = \pi \times \left(\frac{d_1^2}{4}\right) = \pi \times \left(\frac{1,8^2}{4}\right) = 2,54 \text{ m}^2$

$$\phi_2 = \frac{0,04 \times 2,54}{0,1} \times (100 - 15) = 86,4 \text{ W}$$

Ainsi, pour une ébullition de 1h (3600 secondes), l'énergie dissipée sous forme de chaleur est égale à :

$$Q_3 = \frac{86,4 \times 3600}{1000} = 311,04 \text{ kJ}$$

### Calcul de l'énergie totale à apporter

Ainsi l'énergie totale à apporter pour réaliser une ébullition de 60 minutes se calcule en additionnant les pertes à compenser et l'énergie pour faire évaporer l'eau.

$$Q_{total_{60min}} = Q1 + Q2 + Q3 = 337500 + 1145,99 + 311,04 = 338\,957,03 \text{ kJ}$$

En kWh, l'énergie obtenue est :

$$Q_{total_{60min}} = \frac{338\,957,03}{3600} = 94,2 \text{ kWh}$$

Ainsi, pour réaliser une ébullition de 60 minutes d'un moût avec un volume post ébullition de 2000 litres et un taux d'évaporation de 7,5% en prenant en compte les caractéristiques de la cuve, l'énergie nécessaire est 94,2 kWh. Ramenée à l'hectolitre de moût produit, cette consommation d'énergie devient 4,7 kWh/hL de moût produit.

### III.4.3. Adaptation du processus de brassage et économies d'énergie

En ayant l'énergie nécessaire pour faire bouillir le moût pendant 60 minutes, il est désormais possible de la calculer pour 45 minutes d'ébullition afin d'en déduire l'économie d'énergie réalisée. En 60 minutes, l'ébullition évapore 150 L d'eau, cette évaporation devient à 45 minutes :

$$Pertes_{45min} = \frac{45 \times 150}{60} = 112,5 \text{ l}$$

L'énergie totale nécessaire peut être calculée :

$$Q_{total_{45min}} = Pertes_{45min} \times L + 0,75^* \times (Q2 + Q3)$$
$$Q_{total_{45min}} = 112,5 \times 2250 + 0,75 \times (1145,99 + 311,04) = 254\,217,77 \text{ kJ}$$

\*Une réduction du temps de 15 min correspondant à 25% de réduction par rapport à 60 minutes

$$Q_{total_{45min}} = \frac{254\,217,77}{3600} = 70,62 \text{ kWh}$$

L'économie d'énergie E réalisée est :

$$E = Q_{total_{60min}} - Q_{total_{45min}} = 94,2 - 70,62 = 23,6 \text{ kWh/brassin}$$

Ainsi, en réduisant le temps d'ébullition de 15 minutes pour un brassin de 20 hl et dans les conditions décrites, la brasserie économise 23,6 kWh par brassin. Cela représente une économie d'énergie de 1,18 kWh/hl de bière produite. Ainsi une brasserie avec une production de 4000 hl/an (200 brassins de 20 hL) peut espérer économiser 4720 kWh en réduisant les temps d'ébullition de 15 min de tous ses brassins.

En considérant une consommation de 11,8 kWh/hl de bière produite (voir tableau n°2, page 15), un brassin total de 20 hl consomme 236 kWh. Ainsi, l'énergie économisée (4720 kWh) en un an est celle qui pourra être utilisée pour d'autres brassins :

$$\text{Nombre de brassins supplémentaires} = \frac{4720}{236} = 20 \text{ brassins}$$

En mettant en place une réduction de 15 minutes d'ébullition sur tous ses brassins, une brasserie produisant 4000 hl de bière par an peut espérer économiser l'énergie nécessaire à la production de 20 brassins de 20 hL soit 40 000 litres de bières. Cela représente une économie d'énergie égale à 10% de la consommation annuelle énergétique pour 20 brassages.



## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

Au vu du contexte géopolitique mondial et son impact sur les prix de l'énergie dans le monde et en France, les brasseries ont tout intérêt à réduire leur consommation d'énergie lors de leur production. L'ébullition, poste le plus consommateur d'énergie durant le brassage constitue une marge de manœuvre pour les brasseurs et la réduction de l'ébullition constitue un bon moyen de réduire la dépense énergétique. Cependant, l'étape d'ébullition semble impacter un bon nombre de paramètres du produit fini que sont : la couleur, la limpidité, l'amertume, le taux d'alcool et la concentration en DMS. Dans le but d'étudier plus précisément l'impact d'une réduction de 15 minutes du temps d'ébullition sur la bière, une méthodologie de travail et d'analyse a été mise en place.

## IV. Méthodologie et moyens mis en œuvre

### IV.1. Organisation du travail et recherches bibliographiques

#### IV.1.1. Création d'un diagramme de Gantt

Avant de débuter l'étude, et dans le but de planifier le travail sur toute la durée du stage, l'étude a été découpée en plusieurs étapes. Celles-ci sont résumées dans la figure 13.

Afin de visualiser dans le temps les différentes tâches du projet et de suivre son avancement un diagramme de Gantt a été réalisé (annexe 3, page 55)

#### IV.1.2. Recherches bibliographiques

Pour débuter le projet, des recherches ont été réalisées sur la consommation d'énergie en brasserie et les effets de l'ébullition sur la bière. Cela a permis de comprendre la place de l'ébullition dans la consommation d'énergie d'une brasserie et les économies d'énergie réalisées. De plus, la compréhension des réactions biochimiques intervenant durant l'ébullition de la bière a permis de déterminer quels paramètres étaient à analyser et par conséquent les analyses à mettre en place.

### IV.2. Méthodologie pour le brassage et le conditionnement

#### IV.2.1. Choix de la recette

Pour comparer deux temps d'ébullition, une recette a dû être créée. Cette recette a servi pour cette étude et servira pour les différentes expériences qui seront menées au sein de la structure Brewing Theory dans le futur. La recette devait correspondre à un cahier des charges :

- elle doit être facile à brasser pour assurer une bonne répétabilité des tests : empâtage monopolier<sup>26</sup>, pas d'ajout de houblon en hopstand<sup>27</sup> ou en houblonnage à cru<sup>28</sup>(ajout de variabilité selon les installations), pas de modification du profil d'eau ;
- les ingrédients sont simples, peu onéreux et susceptibles d'être présents dans le stock de l'entreprise : les malts qui ont été sélectionnés ne sont pas spécifiques et sont utilisés dans de nombreuses recettes de bière. De même pour les variétés de houblon choisies, qui de plus, sont peu onéreuses comparées à d'autres variétés ;

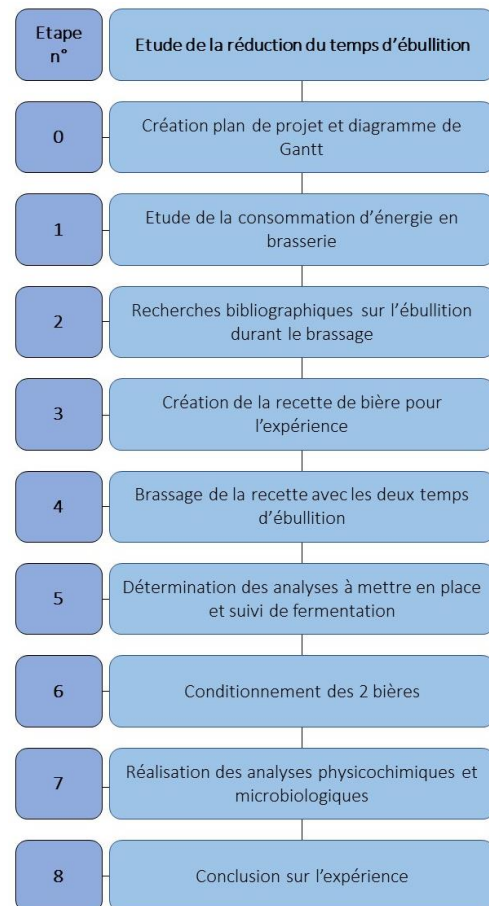


Figure 13 : Diagramme de Gantt (Bellenguez.M, 2022)

<sup>26</sup> Empâtage réalisé à un seul palier de température

<sup>27</sup> Infusion de houblon durant l'étape de whirlpool après ébullition

<sup>28</sup> Ajout de houblon directement dans la cuve de fermentation

- le style de la bière est simple et peut facilement mettre en avant des paramètres d'analyse physicochimique, microbiologique ou sensorielle.

## IV.2.2. Composition de la recette

### IV.2.2.1. Ingrédients

Pour créer une recette de bière, il faut d'abord choisir un style. Le guide de la BJCP<sup>29</sup>, publié chaque année, référence tous les styles de bières existants et leurs caractéristiques associées (historique, arômes, apparence, saveurs...). Il permet facilement de choisir un style en partant de la bière voulue. Le style qui a été choisi pour l'étude est le 18A. Blonde Ale (annexe 4, page 56), il s'agit d'une bière facile à boire, orientée sur le malt, de couleur claire.

Concernant les malts, la liste de grains est composée majoritairement d'un malt de base qui possède un fort pouvoir diastasique<sup>30</sup> et apporte la majorité des sucres pour la fermentation. Le malt choisi est le Pilsen à hauteur de 83,3%. C'est un malt clair, faiblement torréfié durant le maltage, permettant de mettre en évidence la production de DMS (point de comparaison des deux temps d'ébullition). Il est accompagné de malt de froment (13,9%) et de malt Cara clair (2,8%), c'est un malt d'orge qui suit un procédé particulier de caramélisation durant le maltage. Ces deux ajouts permettent d'apporter du corps à la bière et d'améliorer la tenue de la mousse. Le malt Cara clair apporte aussi de la couleur.

Pour les houblons, les variétés et temps d'addition choisis sont résumés dans ce tableau :

Tableau 3 : Quantité et temps d'ajout des houblons de la recette expérimentale (Bellenguez.M, 2022)

Minutes avant la fin	Variété	Acide alpha (%)	Quantité (g)	IBU apportés
45	BREWERS GOLD	6,5	10	14,6
30	TETTNANG	4,5	5	4,5
15	TETTNANG	4,5	10	5,6

Le houblon Brewers gold est un houblon amérisant qui apporte une amertume équilibrée. Il est volontairement ajouté 45 minutes avant la fin de l'ébullition pour que les recettes des deux temps d'ébullition soient identiques. Le houblon Tettnang est utilisé à deux reprises :

- 30 minutes avant la fin pour apporter de l'amertume supplémentaire
- 15 minutes avant la fin pour apporter des arômes épicés et floraux (Hopslis, s.d.)

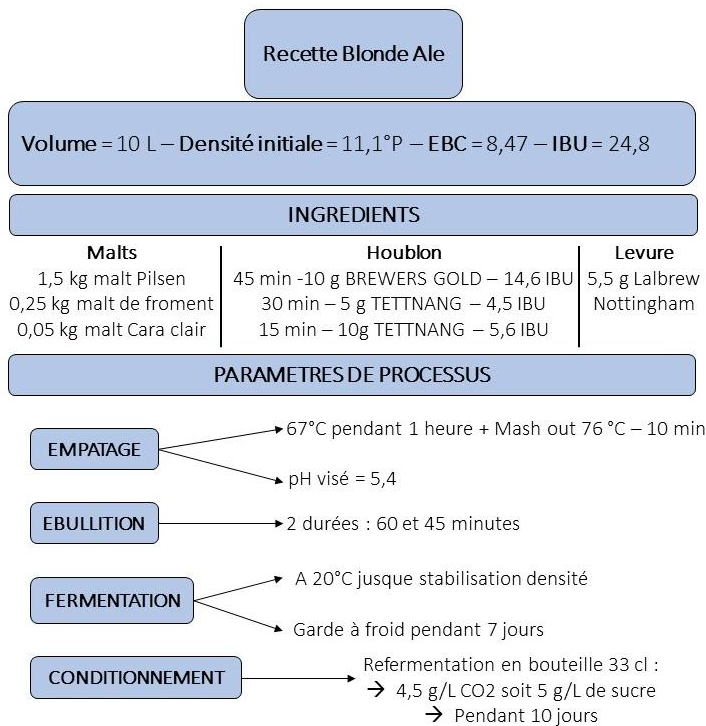
Enfin, la levure utilisée est la Lalbrew Nottingham de Lallemand, c'est une levure anglaise à arômes et saveurs neutres qui fermente assez rapidement (environ 4 jours) (Lallemand brewing, 2022).

<sup>29</sup> Beer Judge Certification program : il s'agit d'une organisation américaine à but non lucratif qui certifie les juges de bière en compétition

<sup>30</sup> Capacité d'un malt à produire les enzymes nécessaires à la conversion de l'amidon en sucres fermentescibles et non-fermentescibles

### IV.2.2.3. Paramètres de brassage et chiffres clés

Entre les deux bières, tous les paramètres du processus de brassage sont exactement les mêmes, une seule chose diffère : le



temps d'ébullition.

L'empâtage a été réalisé à 67°C, il s'agit de la température à laquelle les activités respectives des alpha et beta amylases sont égales. Le but étant d'avoir un moût équilibré entre sucres fermentescibles (qui peuvent être fermentés) et non fermentescibles. Il est suivi d'un mash out à 76°C pour arrêter l'activité enzymatique. Le pH visé était de 5,4 : au milieu de la fenêtre de pH optimale 5,2-5,6.

Concernant la fermentation, elle s'est réalisée à 20°C et est suivie d'une garde à 4°C pour clarifier la bière.

La bière a été embouteillée avec un ajout de 5 g/L de sucre pour viser 4,5 g/L de CO<sub>2</sub> dissous et a refermenté pendant une durée de 10 jours.

Figure 14 : Récapitulatif ingrédients et paramètres de brassage Blonde Ale (Bellenguez.M, 2022)

### IV.2.3. Journée de brassage

Afin d'éviter d'introduire de la variabilité dans l'expérience, les deux bières avec deux temps d'ébullition différents ont été brassées la même journée. Elles ont été brassées sur la même cuve Grainfather G30 en commençant par la bière à 60 minutes d'ébullition puis celle de 45 minutes. Afin de garantir une comparaison objective, plusieurs actions ont été mises en place :

- les malts, les houblons et la levure proviennent du même lot pour les deux recettes ;
- les malts des deux recettes ont été concassés en même temps ;
- entre les deux brassins, la cuve a été rincé soigneusement à l'eau chaude pour la nettoyer puis à l'eau froide pour que l'inox soit à température ambiante ;
- la quantité d'acide lactique ajouté à l'empâtage pour corriger le pH était la même ;
- les fermenteurs ont subi les mêmes durées de désinfection : 20 minutes de trempage dans une solution d'acide peracétique à 2% ;
- les deux bières ont subi une même durée de whirlpool (1 minute).
- 

### IV.2.4. Fermentation et conditionnement

La levure a étéensemencée en fin de journée dans les deux fermenteurs, juste après le brassage de la bière à 45 minutes d'ébullition. Les fermenteurs ont été placés dans la même chambre de fermentation thermostatée à 20°C (voir figure 14).



Figure 15 : Fermenteurs en chambre thermostatée à 20°C (Bellenguez.M, 2022)

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

La méthode de conditionnement choisie a été la refermentation en bouteille, pour cela, les bières ont été transférées dans un seau de resucrage. Afin de garantir un resucrage à 5 g/L le plus précis possible, 7 litres de chaque bière ont été transférés dans le seau avec un ajout de sirop de sucre composé de 35 g de sucre et 100 ml d'eau. Le sucre provenant du même lot. Les bouteilles ont été remplies avec une tige d'embouteillage qui fonctionne par gravité. Une fois embouteillées, elles ont été placées dans la même pièce à même température et à l'abri de la lumière.



Figure 16 : Installation d'embouteillage (Bellenguez.M, 2022)

### IV.3. Méthodologie pour les analyses

#### IV.3.1. Observation des sédiments du moût

Pour qualifier et quantifier les sédiments présents dans le moût de chaque bière, notamment les protéines coagulées, des cônes d'Imhoff en plastique ont été utilisés. En fin de brassage juste après le whirlpool, un litre de moût, encore chaud, a été transféré dans les cônes et placé sur le portoir.



Figure 17 : Moûts de 60 min (à gauche) et 45 min (à droite) dans les cônes d'Imhoff (Bellenguez.M, 2022)

#### IV.3.2. Mesures de densité et pH

Afin de suivre l'évolution des brassages et des fermentations, des mesures de densité et de pH sont effectuées.

Pour essayer de garantir de bonnes mesures, elles ont à chaque fois été prises sur des échantillons à une température la plus proche de 20°C (température d'étalonnage des appareils). Durant le brassage, des mesures de pH ont été prises au début de l'empâtage, après rinçage des drêches, après



Figure 18 : pHmètre Hanna Lab (Bellenguez.M, 2022)

ébullition. Les densités ont été mesurées après rinçage des drêches, 15 minutes avant la fin de l'ébullition et après ébullition.

Durant la fermentation, une mesure de densité et de pH a été prise chaque jour pour chaque bière afin de suivre les cinétiques de fermentation. Ces valeurs ont été regroupées dans un tableur Excel.



Figure 19 : Densimètre DMA 35 (Bellenguez.M, 2022)

### IV.3.3. Mesure de l'EBC et du TAV

Pour mesurer l'EBC<sup>31</sup> et le TAV<sup>32</sup>, dépendants du temps d'ébullition, une filtration de l'échantillon est nécessaire. Pour préparer la filtration, la bière est mélangée à du kieselguhr<sup>33</sup> (une cuillère pour 100 mL de bière environ) dans un erlenmeyer de 500 mL en plastique. La bière est ensuite agitée manuellement pendant une à deux minutes en dégazant régulièrement. Le mélange obtenu est ensuite mis à filtrer sur un papier filtre à l'aide d'un entonnoir et d'une bouteille Schott.



Figure 20 : Filtration des deux bières 1 (Bellenguez.M, 2022)



Figure 21 : Filtration des deux bières 2 (Bellenguez.M, 2022)

La couleur de la bière (EBC) est mesurée par spectrophotométrie à la longueur d'onde 430 nm. 3 mL de filtrat est déposé dans chaque cuvette à l'aide d'une micropipette. Au total, 7 cuvettes sont placées dans le spectrophotomètre : six cuvettes d'échantillon filtré et une cuvette pour effectuer le blanc (eau distillée).

Les 6 valeurs d'absorbance<sup>34</sup> obtenues permettent d'obtenir une valeur d'EBC propre à chaque cuvette grâce au calcul suivant (Brewing Theory, s.d.) :

$$EBC = 25 \times D \times A_{430}$$

Avec D le facteur de dilution et  $A_{430}$  l'absorbance lue à la longueur d'onde de 430 nm dans une cuvette de 1 cm de côté.

En faisant la moyenne des 6 valeurs on obtient l'EBC de l'échantillon testé.



Figure 23 : Alcool mètre et analyseur d'extrait Alex 500 (Bellenguez.M, 2022)



Figure 22 : Spectrophotomètre utilisé pour les analyses (Bellenguez.M, 2022)

En ce qui concerne la mesure du TAV, elle est réalisée grâce à un appareil spécifique, le Alex 500 de Anton Paar, qui est à la fois alcool mètre et analyseur d'extrait. 40 ml de filtrat est nécessaire pour effectuer une mesure.

<sup>31</sup> European Brewery Convention : l'EBC est l'une des unités de couleur de la bière

<sup>32</sup> Titre Alcoométrique Volumique

<sup>33</sup> Variété de roche silicieuse poreuse appartenant au groupe des diatomites qui peut être utilisée pour la filtration

<sup>34</sup> L'absorbance est une grandeur physique mesurant la capacité d'un milieu à absorber la lumière

#### IV.3.4. Mesure du CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dissous

La mesure du CO<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub> dissous est réalisée grâce à l'appareil CboxQC de Anton Paar, analyseur de CO<sub>2</sub> et d'oxygène portable. La préparation de l'échantillon consiste en l'agitation manuelle de la bouteille de bière non décapsulée pendant 2 minutes. La bouteille est ensuite placée dans le carter, une mise sous vide est réalisée. La capsule de la bouteille est ensuite percutée et le liquide prélevé pour analyse. Deux mesures ont été prises pour chaque temps d'ébullition.



Figure 24 : Appareil CboxQC  
(Bellenguez.M, 2022)

#### IV.3.5. Analyses microbiologiques et observations microscopiques

Les analyses microbiologiques permettent de déterminer la flore microbienne présente dans les deux bières. Pour cela, la bière a étéensemencée sur des boîtes de pétri contenant différents milieux de croissance :

- milieu UBA<sup>35</sup> : il permet la croissance de la flore totale (bactéries, levures et moisissures), l'ensemencement est réalisé à la surface de la gélose à l'aide d'un rateau ;
- milieu MRS : il permet la croissance des *Lactobacillus*<sup>36</sup>, sa sélectivité est assurée par son pH acide (5,7), l'ensemencement est réalisé en profondeur lors du coulage de la gélose ;
- milieu Lysine additionné de cycloheximide : il est enrichi en lysine qui est un acide aminé que les levures *Saccharomyces cerevisiae* n'utilisent pas alors que beaucoup d'autres levures dont les levures sauvages<sup>37</sup> l'utilisent. L'addition de cycloheximide empêche le développement de *Saccharomyces Cerevisiae*. Il permet donc de mettre en évidence les levures sauvages. L'ensemencement est fait en surface.

Les milieux ont étéensemencés sous un poste de sécurité microbiologique de type 2 et incubés pendant 3 jours à 25°C pour les milieux MRS et UBA et 3 jours à 30°C pour le milieu lysine.

Pour observer les microorganismes, des colorations de Gram ont été faites. La coloration de Gram consiste à prélever une colonie et l'étaler sur une lame de verre pour la fixer à la chaleur. Tout d'abord la lame est colorée avec une solution de violet de gentiane et une solution de lugol. La préparation est ensuite décolorée avec de l'alcool. Enfin, une contre coloration est faite avec de la fuschine. Les bactéries à Gram positif<sup>38</sup> apparaissent violet et celles à Gram négatif<sup>39</sup> apparaissent roses.

#### IV.3.6. Analyse sensorielle

Afin de mettre en évidence des différences éventuelles au niveau gustatif entre les deux temps d'ébullition, un test triangulaire a été réalisé. Celui-ci consiste à présenter à un individu trois échantillons anonymes, parmi ces trois échantillons, deux sont identiques. Il est alors demandé à l'individu d'identifier le produit différent.

Pour mettre en place ce test triangulaire, des verres de dégustation opaques ont été utilisés afin que les dégustateurs se concentrent uniquement sur ce qu'ils goûtent.

<sup>35</sup> Universal Beer Agar

<sup>36</sup> Genre de bactérie appartenant à la famille des *Lactobacillaceae*

<sup>37</sup> Une levure sauvage est une levure qui n'est pas utilisée à des fins de production et dont la présence n'est pas maîtrisée

<sup>38</sup> Bactérie avec une paroi cellulaire fine

<sup>39</sup> Bactérie avec une paroi cellulaire épaisse

A ces verres sont attribués des numéros tirés au sort dans l'intervalle [1 ; 999], à ces mêmes numéros étaient attribués la lettre A ou B (A correspondant à un temps d'ébullition de 45 min et B à 60 min). Les combinaisons de présentation possibles sont : ABB, AAB, ABA, BAA, BBA, BAB. Chaque combinaison tirée au sort est associée à un trio de numéro selon l'ordre de tirage.

Exemple : la combinaison tirée au sort est ABA et le premier numéro tiré au sort est 735 alors le verre 735 contiendra l'échantillon A (45 minutes).



Figure 25 : Verres opaques utilisés pour le test triangulaire (Bellenguez.M, 2022)

Ainsi, l'ensemble de cette méthodologie a été appliqué et a permis d'obtenir des résultats. Ceux-ci sont présentés dans la partie suivante et permettront de tirer quelques conclusions quant à l'impact d'une réduction de 15 minutes du temps d'ébullition sur la bière.

## V. Présentation et analyse des résultats

### V.1. Comparaison des deux brassages

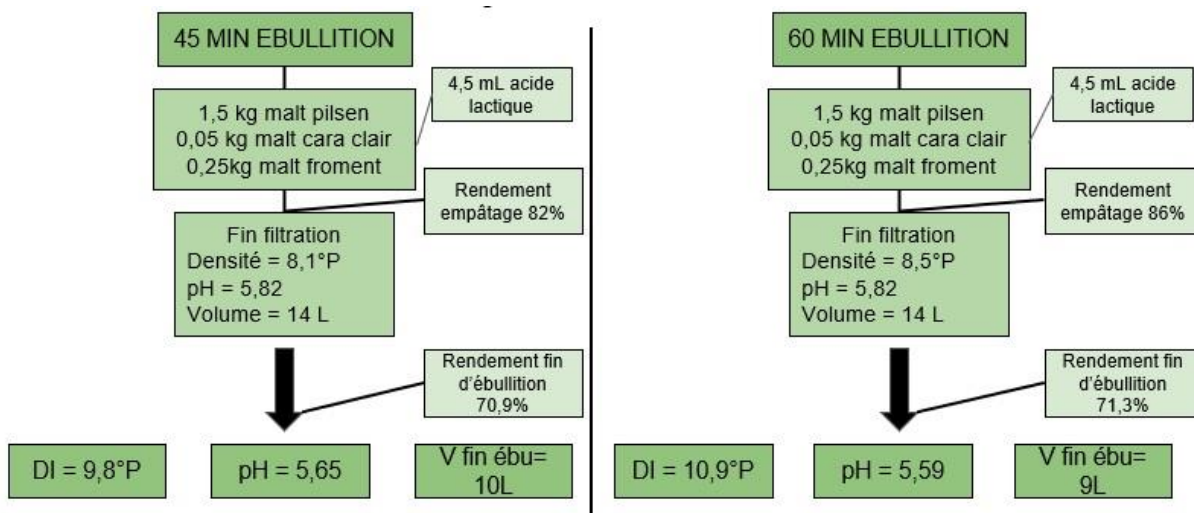


Figure 26 : Comparaison des brassages à 45 min et 60 min d'ébullition (Bellenguez.M, 2022)

La figure 26 ci-dessus propose un résumé des deux brassages. Malgré l'utilisation de la même quantité d'ingrédients et d'acide lactique, les rendements d'empâtage ont été différents : 86% pour la bière à 60 minutes et 82% pour 45 minutes. L'extraction des sucres a été plus faible pour la bière à 45 minutes : la densité obtenue, c'est à dire la concentration de sucres fin filtration (ou pré-ébullition) est plus faible : 8,1°P contre 8,5°P pour le brassage 60 minutes. Néanmoins, les pH sont équivalents, égaux à 5,82. Après l'ébullition les densités initiales obtenues (DI) sont donc différentes : 9,8°P pour 45 minutes d'ébullition et 10,9°P pour 60 minutes.

Deux choses permettent d'expliquer une densité initiale plus faible pour l'ébullition de 45 minutes :

- un rendement d'empâtage plus faible (indépendant du temps d'ébullition) ;
- une ébullition moins longue se traduisant par une évaporation moindre de l'eau : le moût qui en résulte est donc plus dilué et moins concentré en sucre (moins dense).



Concernant le pH, ils sont proches, le temps d'ébullition semble faiblement impacter le pH du moût. Enfin, les volumes de fin d'ébullition ( $V_{\text{fin ébu}}$  sur la figure 26) sont les volumes de moût présents transférés en fermenteur auxquels a été ajouté un litre dans le calcul. Il s'agit du volume prélevé pour l'analyse des sédiments. Il y a une différence de 1 litre entre les deux volumes de fin d'ébullition, celle-ci provient uniquement de l'évaporation durant l'ébullition puisque les volumes pré-ébullition sont équivalents (14 L).

La cuve Grainfather G30 connect utilisée possède un taux d'évaporation de 3L/h, signifiant que 3 litres d'eau sont évaporés par heure d'ébullition. En partant sur cette base, la quantité d'eau théorique évaporée pour 45 minutes d'ébullition peut être calculée :

$$V_{\text{eau évaporée 45min}} = \frac{3 \times 45}{60} = 2,25 \text{ L}$$

Ainsi, théoriquement, pour 45 minutes d'ébullition, 0,75 L d'eau ne sont pas évaporés (3-2,25). Cela ne correspond pas exactement au litre de différence observé durant l'expérience. En effet, les graduations des fermenteurs sont peu précises et sont présentes à titre indicatif. Elles permettent de donner des approximations du volume, ce qui peut expliquer cette différence.

De plus, le brassage avait pour but d'obtenir dans la théorie dix litres de moût en fermenteur pour 60 minutes et 10,75 litres pour 45 minutes. Il existe en réalité des pertes (absorption de moût par les houblons, pertes dans les tuyaux...).

## V.2. Comparaison des moûts

### V.2.1. Analyse de l'EBC sur le moût

Une mesure de l'EBC a été réalisée sur les deux moûts de bière. A première vue, le moût qui a été bouilli pendant 60 minutes (à gauche sur la figure 27) est plus foncé que le moût bouilli pendant 45 minutes (à droite). Voici les résultats obtenus par le spectrophotomètre :

Tableau 4 : Absorbances mesurées sur les deux moûts et équivalent en EBC (Bellenguez.M, 2022)

	Moût 45 minutes	Moût 60 minutes
<b>Absorbance moyenne</b>	0,260	0,318
<b>EBC Moyen</b>	6,48	7,96

Les absorbances mesurées par le spectrophotomètre confirment l'observation. Le moût bouilli 60 minutes a une absorbance supérieure à celui de 45 minutes et donc une couleur (EBC) plus foncée.

### V.2.2. Analyse des sédiments

Les cônes d'Ihmoff permettent d'apprécier la couleur de deux liquides mais surtout la composition en sédiments de ceux-ci. La coagulation des protéines étant dépendante du temps d'ébullition, les cônes d'Ihmoff, gradués, sont utiles pour quantifier et qualifier les sédiments présents et déterminer des éventuelles différences.



Figure 27 : Comparaison de la couleur des moûts (Bellenguez.M, 2022)

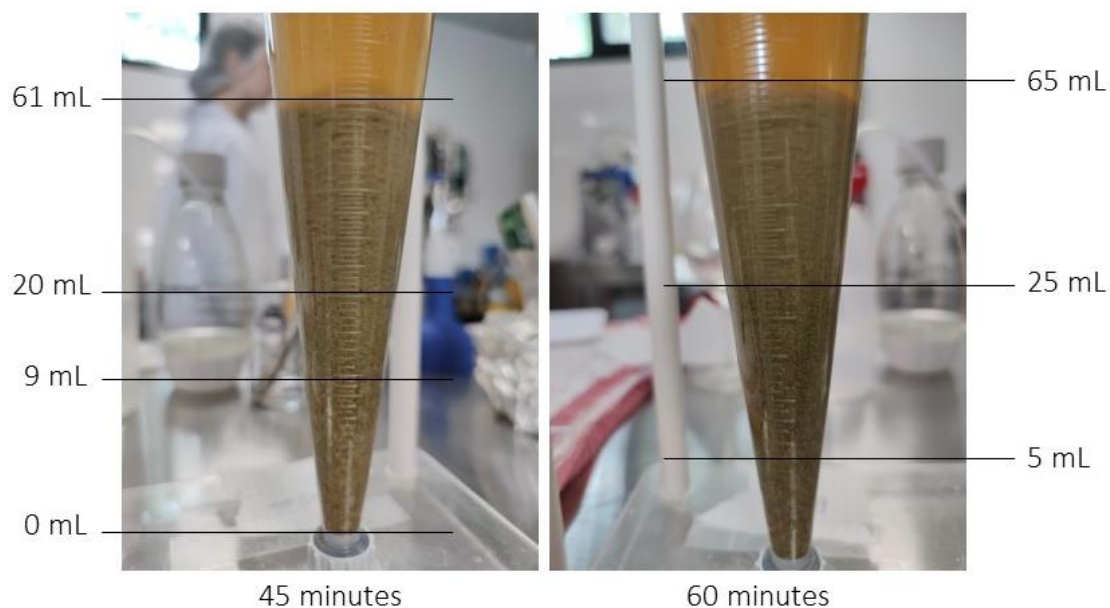


Figure 28 : Composition en différents sédiments des moûts (Bellenguez.M, 2022)

La figure 28 ci-dessus illustre la composition en sédiments de chaque cône. Du bas vers le haut, les différents types de sédiments sont :

- particules grossières de grain et écorces de malt ;
- particules de houblon ;
- protéines coagulées.

Les quantités de chaque sédiment pour chaque moût ont été regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Quantités et nature des sédiments contenus dans les moûts (Bellenguez.M, 2022)

	Moût 45 minutes	Moût 60 minutes
<b>Particules grossières (mL)</b>	9	5
<b>Particules de houblon (mL)</b>	11	20
<b>Protéines coagulées (mL)</b>	41	40
<b>Total (mL)</b>	61	65

A 4 mL près, les moûts possèdent la même quantité de particules. A la fin du brassage, la quantité de particules présentes en suspension dans le moût est fortement dépendante du whirlpool. Le fait que celui-ci ait été réalisé manuellement dans le cadre de cette étude apporte beaucoup de variabilité. C'est pour cela qu'il existe une grande différence au niveau des particules de houblon : presque deux fois plus pour le moût à 60 minutes, malgré les mêmes quantités ajoutées.

Seule la quantité de protéines coagulées est censée dépendre du temps d'ébullition, puisque cette dernière permet la précipitation des protéines. Plus de protéines sont observées pour l'ébullition à 45 minutes (1 mL). Cela aurait dû être l'inverse car plus l'ébullition est longue, plus les protéines coagulent et plus la quantité de protéines précipitée est grande. Néanmoins, la différence observée reste très faible.

## V.3. Comparaison des fermentations

Les courbes de fermentation issues des mesures quotidiennes de pH et de densité sont les suivantes :

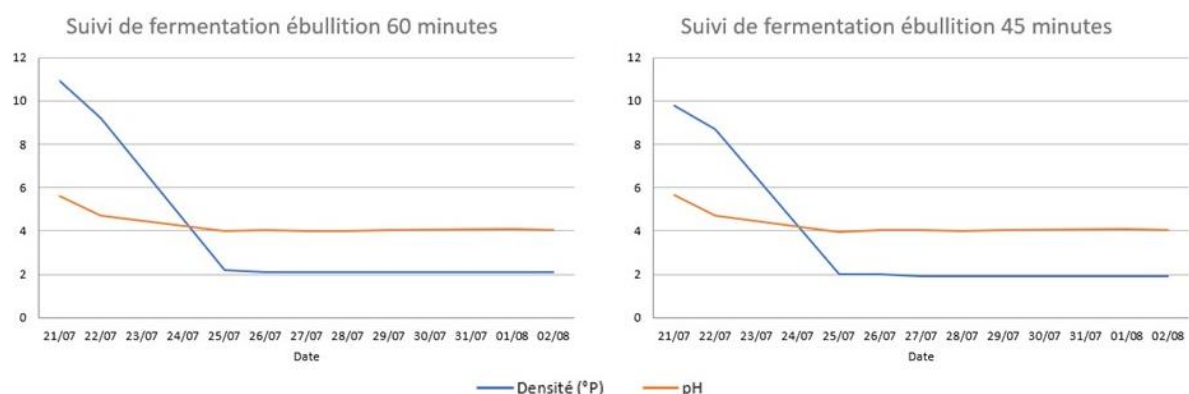


Figure 29 : Comparaison des cinétiques de fermentation de la levure pour les deux moûts (Bellenguez.M, 2022)

Les courbes de fermentation ont les mêmes allures. Pour les deux bières, le pH diminue fortement pendant les premières 24 heures puis se stabilise au bout de 4 jours à une valeur proche de 4. Le temps d'ébullition a visiblement peu d'influence sur le pH de la bière pendant la fermentation.

Concernant les densités, les deux courbes ont les mêmes allures et la densité finale est quasiment atteinte au bout de 4 jours. Les valeurs sont résumées dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Récapitulatif et comparatif des densités, du taux d'alcool et de l'atténuation à l'issue de la fermentation (Bellenguez.M, 2022)

	Densité initiale (°P)	Densité finale (°P)	Taux d'alcool (%)	Atténuation (%)
<b>45 minutes</b>	9,8	1,9	4,17	81,14
<b>60 minutes</b>	10,9	2,1	4,67	81,31

Les deux bières ont sensiblement la même atténuation : malgré des temps d'ébullition différents, les propriétés de la levure semblent être conservées. En effet, les valeurs des densités sont différentes mais la levure a métabolisé, en pourcentage, la même quantité de sucre dans les deux cas de figure.

## V.4. Analyses physicochimiques des deux bières

### V.4.1. CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dissous

Tableau 7 : Données obtenues suite à la mesure de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dissous des deux bières (Bellenguez.M, 2022)

		CO <sub>2</sub> dissous (g/L)	O <sub>2</sub> dissous (ppb)	Pression (bar)
<b>45 min</b>	1ère mesure	4,32	4080	2,848
	2ème mesure	4,41	3806	2,815
	<b>Moyenne</b>	<b>4,365</b>	<b>3943</b>	<b>2,832</b>
<b>60 min</b>	1ère mesure	4,48	3467	3,012
	2ème mesure	4,47	3482	2,854
	<b>Moyenne</b>	<b>4,475</b>	<b>3475</b>	<b>2,933</b>

Le tableau n°7 récapitule les données obtenues lors de la mesure de gaz dissous. La mesure du CO<sub>2</sub> dissous permet de déterminer la carbonatation de la bière c'est-à-dire sa pétillance. Le sucre ajouté à l'embouteillage avait pour but d'atteindre 4,5 g/L de CO<sub>2</sub>. Cela a été presque atteint pour la bière à 60 minutes (tableau 7) mais, pour la bière à 45 minutes, il manque encore 0,135 g/L de CO<sub>2</sub>.

Cette différence s'explique peut-être par le temps d'ébullition ou par des erreurs de manipulation durant l'embouteillage. Par exemple, si lors du resucrage de la bière à 45 minutes, la même quantité de sucre (35 g) a été utilisée mais que le volume resucré était légèrement supérieur à 7 litres, des différences de carbonatation peuvent apparaître.

Concernant l'O<sub>2</sub> dissous, les valeurs pour les deux bières sont élevées, cela s'explique par la méthode d'embouteillage et le matériel utilisés qui engendrent des contacts entre la bière et l'air ambiant (air dans les tuyaux de transfert, dans les bouteilles...). Les recherches effectuées sur les processus biochimiques se déroulant pendant l'ébullition ne prédisaient pas une différence d'oxygène dissous entre les deux bières. Ainsi, cette différence résulte probablement des manipulations.

La pression en bar représente la pression interne de la bouteille, en lien avec le CO<sub>2</sub> dissous. Elle est logiquement plus élevée pour la bière à 60 minutes d'ébullition.

### V.4.2. Titre alcoométrique volumique (TAV)

Une mesure du taux d'alcool a été réalisée grâce à l'appareil Alex 500 de Anton Paar.

Tableau 8 : Données obtenues suite à l'analyse de l'appareil Alex 500 des deux échantillons de bière (Bellenguez.M, 2022)

	TAV	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Extrait d'origine (°P)
<b>45 minutes</b>	4,44	1,0046	10,11
<b>60 minutes</b>	4,74	1,0055	10,86
<b>Précision (+/- )</b>	0,2	0,001	

Dans ce cas et avec le matériel utilisé, une différence de 0,3% d'alcool est observée entre les deux bières. Etant donné que la bière à 45 minutes est bouillie 15 minutes de moins, moins d'eau est évaporé et donc le moût obtenu est plus dilué (moins concentré en sucres). Cette différence de taux de sucre se traduit par un taux d'alcool différent post fermentation.

L'appareil donne également l'extrait d'origine (en °P), cela correspond à la densité initiale de la bière. Pour les deux bières, les données initiales obtenues après brassage étaient :

- 10,9°P pour la bière à 60 minutes ce qui correspond à 0,04°P près à ce que mesure l'appareil ;
- 9,8°P pour la bière à 45 minutes, correspondant à une différence de 0,31°P (plusieurs hypothèses permettront d'expliquer cette différence dans la partie « VI. Discussion et perspectives »).

En raison de cette différence de taux d'alcool et dans le but de produire une bière au même TAV, il faudra prévoir une adaptation de la recette utilisée si le brasseur décide de diminuer le temps d'ébullition d'une bière initialement bouillie pendant 60 minutes.

### V.4.3. Mesure de l'EBC

Comme pour les moûts, une mesure de l'EBC a été réalisée sur les deux bières après refermentation en bouteille. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 9, ils sont comparés à ceux obtenus pour les moûts :

Tableau 9 : Résultats obtenus après mesure de l'absorbance au spectrophotomètre des deux bières (Bellenguez.M, 2022)

	Bière 45 minutes	Bière 60 minutes	Moût 45 minutes	Moût 60 minutes
<b>Absorbance moyenne</b>	0,160	0,180	0,260	0,318
<b>EBC Moyen</b>	4,12	4,50	6,48	7,96

Les résultats donnés par le spectrophotomètre sur les bières suivent la logique des résultats obtenus sur les moûts. La bière à 60 minutes d'ébullition a en effet développé une couleur plus sombre que celle à 45 minutes : 4,5 EBC contre 4,12. De plus, le processus de fermentation semble avoir clarifié la bière. Du moût à la bière de 45 minutes, cela passe de 6,48 à 4,12 EBC et de 7,96 à 4,50 EBC pour 60 minutes. L'écart d'EBC reste cependant faible entre les deux bières, comparé à l'écart obtenu entre les moûts : il était de 1,48 entre les moûts et il n'est plus que de 0,38 entre les bières. Cet écart d'EBC pourtant assez faible au niveau des valeurs permet de distinguer les bières assez facilement à l'œil nu (voir figure 30).

Une réduction de seulement 15 minutes du temps d'ébullition a pour effet de créer une bière plus claire. Cela résulte potentiellement d'une réaction de Maillard, responsable notamment du développement de la couleur, qui est écourtée lors d'une ébullition à 45 minutes. La quantité de mélanoidines formée est moindre se traduisant par une couleur plus claire.



Figure 30 : Comparaison de la couleur des bières 45 min (gauche) et 60 min (droite) (Bellenguez.M, 2022)

## V.5. Analyses microbiologiques

### V.5.1. Milieu UBA

#### V.5.1.1. Comparaison des géloses

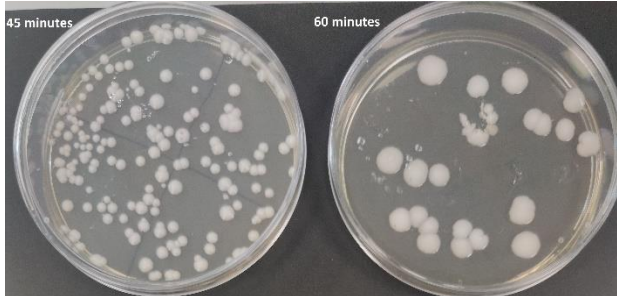


Figure 31 : Comparaison des boîtes de Pétri contenant le milieu UBA (Bellenguez.M, 2022)

Les géloses des deux bières indiquent que des microorganismes ont réussi à croître et qu'ils sont présents dans les deux bières. D'apparence, il existe des différences et des similitudes entre ces deux colonies (voir tableau 10)

Tableau 10 : Similitudes et différences morphologiques entre les colonies de la bière 45 min et 60 min sur gélose UBA (Bellenguez.M, 2022)

Similitudes	Différences
<ul style="list-style-type: none"><li>- Couleur blanc crème</li><li>- Forme ronde</li><li>- Surface lisse</li><li>- Opaque</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Taille : 7-10 mm pour 60 min et 2-5 mm pour 45 min</li><li>- Nombre : 26 UFC<sup>40</sup> pour 60 minutes et 186 UFC pour 45 minutes</li></ul>

La seule différence morphologique entre les colonies des deux moûts est la taille. Au vu de leur grand nombre et de l'uniformité des colonies, une interprétation possible est que ces microorganismes soient des levures *Saccharomyces cerevisiae*. L'échantillon de bière à 45 minutes aurait contenu plus

<sup>40</sup> UFC = Unité Formant Colonie

de levures en suspension ce qui explique leur nombre et leur plus petite taille : elles sont plus nombreuses et donc il existe plus de compétition sur le milieu de culture.

Une observation microscopique avec une coloration de Gram permettra de déterminer la nature de ces microorganismes.

### V.5.1.2. Observation microscopique

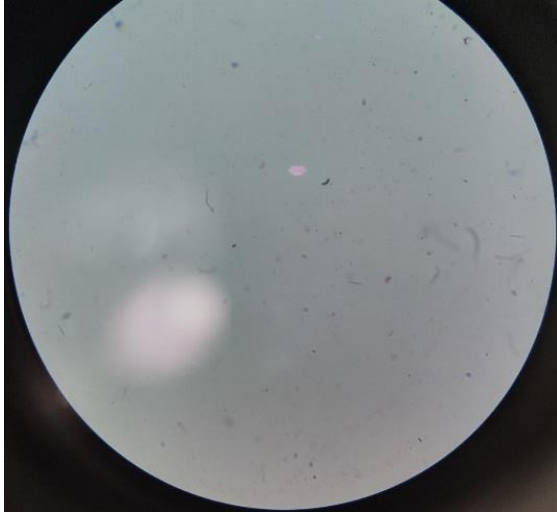


Figure 33 : Observation microscopique des colonies sur gélose UBA de la bière 45 min après coloration de Gram (Bellenguez.M, 2022)

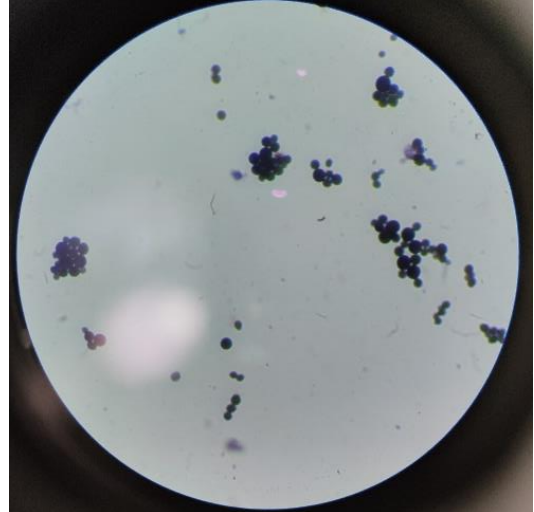


Figure 32 : Observation microscopique des colonies sur gélose UBA de la bière 60 min après coloration de Gram (Bellenguez.M, 2022)

Les figures ci-dessus (figures 32 et 33) sont les observations microscopiques des bières sur le milieu UBA. Pour la bière 45 minutes, l'observation microscopique n'a pas permis d'observer les levures, elles sont pourtant présentes sur les géloses : la réussite d'une observation microscopique dépend aussi de la préparation de la lame en amont. En revanche, pour la bière 60 minutes, les regroupements de levure sont facilement observés au microscope, ces levures semblent être celles qui ont étéensemencées en début de fermentation. La figure 34 semble confirmer que les microorganismes observés soient des *Saccharomyces cerevisiae*.

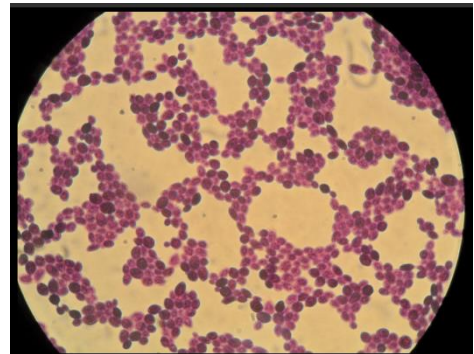


Figure 34 : Observation microscopique de *Saccharomyces cerevisiae* après coloration de Gram (Université pontificale Javeriana)

### V.5.2. Milieu Lysine additionné de cycloheximide

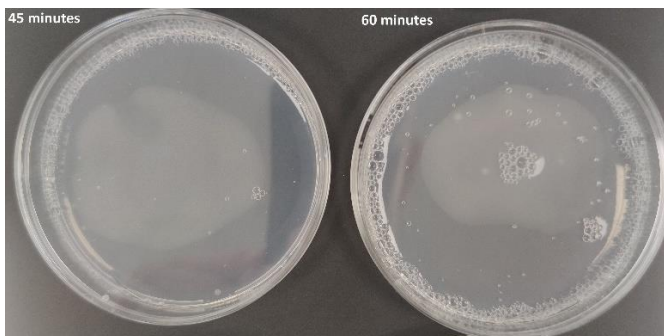


Figure 35 : Comparaison des boîtes de Pétri contenant le milieu lysine (Bellenguez.M, 2022)

L'observation des géloses montre qu'aucun microorganisme n'a crû. Le milieu lysine additionné de cycloheximide permettant de mettre en évidence la présence de levure sauvage, les deux bières ne semblent pas avoir été infectées par celles-ci. De ce fait, aucune observation microscopique n'a été réalisée pour le milieu Lysine

### V.5.3. Milieu MRS

#### V.5.3.1. Observation des géloses

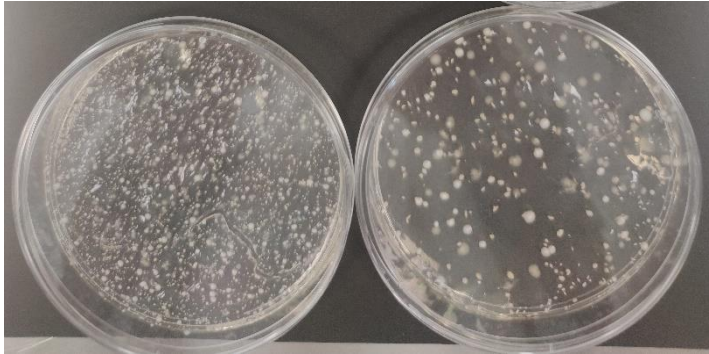
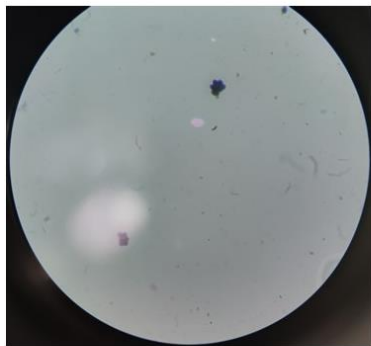


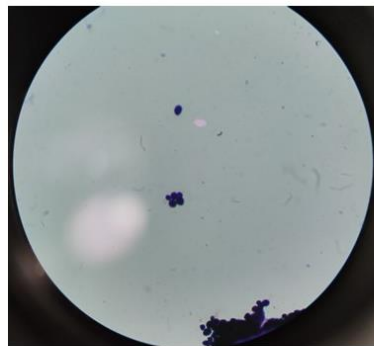
Figure 36 : Comparaison des boîtes de Pétri contenant le milieu MRS (Bellenguez.M, 2022)

Les géloses MRS qui permettent une croissance facilitée des *Lactobacillus* ont permis la croissance de certains microorganismes (figure 36). A l'instar des géloses UBA, la bière à 45 minutes présente plus de colonies et plus petites que la bière à 60 minutes. En raison de leur nombre, celles-ci n'ont pas été dénombrées. En dehors de la taille et du nombre, les colonies sont similaires : de couleur blanc crème, opaques, avec des formes circulaires et ovales, une surface lisse, un contour régulier et une taille allant de 1 à 3 mm. Une coloration de Gram et une observation microscopique ont été faites pour déterminer la nature de la flore microbienne.

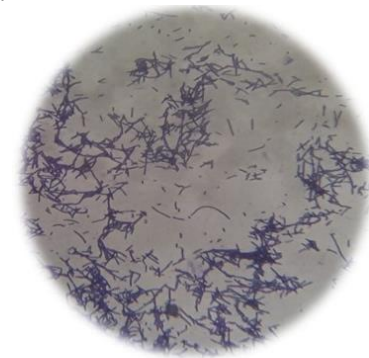
#### V.5.3.2. Observation microscopique



45 minutes



60 minutes



Lactobacilles au microscope (coloration de Gram)

Figure 37 : Observations microscopiques des colonies prélevées sur gélose MRS après coloration de Gram et comparaison avec une observation microscopique de lactobacilles (Bellenguez.M, Drprabhurajeshwar C.)

Tout d'abord, même si les colonies des deux géloses présentaient une différence de taille, les observations obtenues via le microscope semblent être identiques pour les deux bières. Par comparaison avec les observations microscopiques des géloses UBA (figures 32 et 33 page 31) et de la figure montrant des levures après coloration de gram (figure n°34), les microorganismes ayant poussé sur les géloses MRS semblent être des levures *Saccharomyces cerevisiae*. De plus, la figure n°34 montre que les microorganismes observés ne correspondent pas à des lactobacilles, qui sont sous forme de bâtonnet. Ainsi, aucune des deux bières ne semblent être infectée par une bactérie du genre *Lactobacillus*.

En plus des cellules de levures, quelques bactéries sous forme de coques ont été observées dans les deux bières. Ces bactéries n'ont pas pu être déterminées.

## V.6. Analyse sensorielle

Au total, 12 dégustateurs ont participé au test triangulaire. Les niveaux d'expérience variaient selon les profils, allant du consommateur régulier au brasseur professionnel mais tous les participants étaient au moins consommateurs réguliers de bière. Le nombre minimum de jugements corrects nécessaires pour que le test soit statistiquement significatif est résumé dans le tableau 11.

Tableau 11 : Nombre minimum de jugements correct par rapport au nombre de jugements total nécessaire pour déterminer une différence sensorielle lors d'un test triangulaire (Agroparistech)

Alors que huit participants, au minimum, devaient identifier l'échantillon unique (pour un seuil de confiance minimale de 95%, seulement six dégustateurs ont réussi. Cela signifie que les participants n'ont pas réussi à identifier de manière fiable l'échantillon différent.

Parmi les six dégustateurs ayant donné des jugements corrects figuraient 2 brasseurs professionnels, un ancien brasseur professionnel, deux

Nombre de jugements	Nombre minimum de jugements corrects		
	Seuil de confiance (%)		
	95	99	99,9
9	6	7	8
10	7	8	9
11	7	8	9
12	8	9	10
13	8	9	10
14	9	10	11
15	9	10	12

consommateurs réguliers et un brasseur amateur. Cela laisse penser que la différence perçue en bouche est identifiée par des personnes expérimentées en dégustation et en brassage.

Après annonce des résultats aux participants, ceux-ci ont identifié plus d'amertume sur la bière avec un temps d'ébullition à 45 minutes alors que la bière à 60 minutes était plus douce et aqueuse. En revanche, aucun dégustateur n'a mis en évidence le goût de légume cuit traduisant une quantité de DMS trop importante (point de variabilité du temps d'ébullition).

Ces résultats concernant l'amertume peuvent s'expliquer grâce à un paramètre utilisé lors de la création d'une recette de bière : le ratio IBU/DI. Ce ratio compare l'amertume apportée par les houblons par rapport à la densité initiale de la bière avant fermentation. En règle générale, pour un même niveau d'IBU, plus la densité initiale est grande, plus le taux d'alcool final est élevé et moins l'amertume se ressent. Autrement dit, plus la DI est faible, plus le ratio IBU/DI est grand et plus on ressentira l'amertume. Ici, la bière à 45 minutes a une DI égale à 9,8°P contre 10,9°P pour la 60 minutes. Ces deux bières ont eu les mêmes additions de houblon apportant 24,8 IBUs. Les ratios obtenus sont :

$$\text{IBU/DI}_{45\text{min}} = 24,8/1,039 = \mathbf{23,87}$$

$$\text{IBU/DI}_{60\text{min}} = 24,8/1,044 = \mathbf{23,75}$$

Même si les différences de ratio ne sont pas grandes, la figure 38 illustre mieux cette notion. Pour les deux bières, le ratio se situe dans la zone « Slightly hoppy » soit légèrement houblonné. Néanmoins, les bières se situant sur la même zone du graphique, elles sont en réalité assez éloignées. En effet, la bière à 45 minutes se situe presque dans la zone « Extra hoppy » soit très houblonné et la bière à 60 minutes dans « Evenly balanced » soit équilibré.

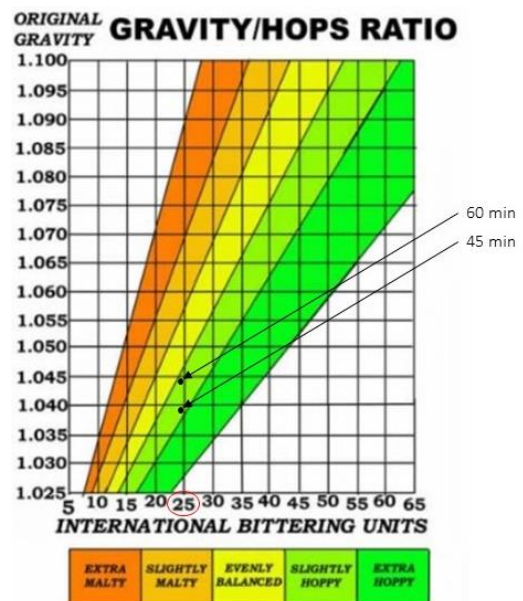


Figure 38 : Ratio IBU/DI (Rolling beers, 2021)



## V.7. Bilan intermédiaire des analyses

Suite à ces analyses, plusieurs choses peuvent être déduites. La réduction du temps d'ébullition a montré que pour une même recette, une des conséquences est une plus faible concentration du moût dû à une évaporation moins longue. A l'issue de l'ébullition, le moût est moins sucré. Cela donne après fermentation une bière moins forte en alcool avec une différence de 0,3% dans le cadre de cette expérience. Cette différence de taux d'alcool dépend de la différence de volume post ébullition et donc du taux d'évaporation de l'installation utilisée.

En revanche, une réduction de 15 minutes du temps d'ébullition ne semble pas avoir d'effet sur le pH. De même, la comparaison de la composition en sédiments de chaque moût a montré qu'une réduction du temps d'ébullition de l'ordre de 15 minutes n'impactait pas significativement la quantité de sédiments et surtout de protéines coagulées.

En retirant 15 minutes au temps d'ébullition habituel de 60 minutes, la bière semble développer moins de couleur. Ainsi, l'une des conséquences est le développement d'une couleur plus claire chez la bière dont le temps d'ébullition est réduit. Cette différence est notamment plus marquée sur les moûts que sur les bières et la différence d'EBC est plus marquante à l'œil nu qu'en termes de valeurs.

Concernant la fermentation, celle-ci est peu influencée par le temps d'ébullition. La levure conserve à priori sa cinétique de fermentation. En effet, les densités finales respectives de chaque bière ont été atteintes à un jour d'intervalle. L'atténuation de la levure est conservée. La densité initiale plus faible résultant de 15 minutes d'ébullition en moins a donné après fermentation une bière avec moins de sucres résiduels que celle à 60 minutes.

Au niveau microbiologique, des différences ont été observées au niveau quantitatif seulement. Pour chaque milieu et chaque bière, les microorganismes observés semblaient être les mêmes : les levures *Saccharomyces cerevisiae*ensemencées pour la fermentation. Néanmoins, une différence quantitative a été observée : la bière bouillie durant 45 minutes présentait pour les géloses UBA et MRS plus de colonies. Cette variabilité semble venir de l'échantillon analysé.

Enfin, le test sensoriel triangulaire a montré que statistiquement, le public de dégustateurs n'a pas réussi à différencier les deux bières de façon fiable. Néanmoins, les six dégustateurs ayant trouvé l'échantillon différent sont tous expérimentés en dégustation et ont reporté les différences suivantes :

- la bière à 60 minutes est plus aqueuse et légère ;
- la bière à 45 minutes est plus amère.

Les analyses menées dans le cadre de cette expérience ne permettent pas d'analyser l'entière des paramètres de la bière. De plus, les conditions expérimentales dans lesquelles elles ont été réalisées n'ont pas toujours été optimales. Pour compléter cette étude, d'autres analyses auraient pu être réalisées et certains résultats méritent d'être remis en question.

## VI. Discussion et perspectives

### VI.1. Résultats

#### VI.1.1. Synthèse des résultats principaux et mise en relation avec la bibliographie

Ainsi, les résultats de cette étude montrent qu'une réduction du temps d'ébullition entraîne inévitablement une baisse du taux d'alcool en raison d'une plus faible quantité d'eau évaporée. Avec le matériel utilisé, cette différence était de 0,3% d'alcool. Pour un même niveau d'IBU, ce taux d'alcool plus faible a pour effet de faire ressortir plus l'amertume. C'est ce que les dégustateurs du test triangulaire ayant trouvé l'échantillon différent ont rapporté. Cette différence de taux d'alcool va varier selon les installations et le taux d'évaporation : plus le taux d'évaporation est petit, plus la différence de quantité d'eau évaporée entre deux temps d'ébullition sera faible et plus la différence de densité initiale donc de TAV sera petite.

Si une réduction du temps d'ébullition est envisagée, il sera donc important de reconfigurer la recette pour qu'elle possède les mêmes caractéristiques (DI, IBU et volume)

L'utilisation d'un malt Pilsen clair, connu pour développer plus de DMS, associé à une ébullition plus courte, moins évaporative, laissent penser le développement d'un faux-goût dans la bière à 45 minutes. Néanmoins, aucun goût de légume cuit (caractéristique du DMS) n'a été rapporté par les 12 dégustateurs. D'autre part, le test triangulaire n'a statistiquement pas montré de différence sensorielle majeure entre deux bières avec une durée de 60 et 45 minutes d'ébullition.

En diminuant le temps d'ébullition, la bière développe une couleur plus claire. Cette différence de couleur peut s'expliquer par la réaction de Maillard qui se déroule pendant l'ébullition. Elle est formatrice notamment de mélanoidines, composés responsables de certaines saveurs et du développement de la couleur. Un temps d'ébullition réduit signifie une réaction de Maillard plus courte : la bière obtenue contient moins de mélanoidines et est donc plus claire.

#### VI.1.2. Remise en cause des résultats obtenus et analyses complémentaires

##### VI.1.2.1. Remise en question des résultats

Lors de cette étude, certaines expériences et leurs résultats peuvent être remis en cause selon les conditions dans lesquelles elles étaient réalisés. Tout d'abord, seulement 12 personnes ont participé au test triangulaire alors qu'en général un nombre de 24 à 30 personnes est recommandé pour obtenir des résultats significatifs. L'analyse sensorielle est donc moins fiable avec 12 personnes que si elle avait été réalisée avec un plus grand panel.

Lors de la mesure de la couleur (EBC) sur les deux moûts de bière, la première qui a été transférée dans les cônes d'Ihmoff était celle bouillie durant 60 minutes car c'est celle-ci qui a été brassée en 1<sup>er</sup>. Ce n'est que le lendemain matin que les analyses EBC au spectrophotomètre ont été réalisées. Ainsi entre la fin du brassage et l'analyse, les deux moûts de bière ont eu le temps de s'oxyder, encore plus pour la bière à 60 minutes qui a été transférée avant celle de 45 minutes. L'oxydation étant responsable du brunissement de la couleur, les valeurs d'EBC mesurées ont pu être faussées. Néanmoins, cette différence de couleur ne peut pas être due uniquement à l'oxydation puisqu'il existait tout de même une différence d'EBC après fermentation, plus faible que celle des moûts cependant. Cette différence de couleur plus grande sur les moûts peut s'expliquer en partie par le fait que la bière à 60 minutes soit restée plus longtemps dans le cône que la 45 minutes (d'une durée

équivalente à un brassage soit environ 5 heures). Il aurait fallu transférer le moût dans le cône pour l'observation des sédiments et transférer un autre volume refroidi autour de 20°C pour réaliser les analyses EBC. La couleur des moûts directement après ébullition aurait pu être comparée.

En plus de la mesure d'EBC, les analyses microbiologiques auraient pu être réalisées sur le moût et non sur la bière. En effet, en réalisant les analyses sur la bière embouteillée, de la variabilité a été apportée. Des microorganismes ont pu être introduit lors du transfert en fermenteur et lors de l'embouteillage, le matériel et les manipulations n'étant pas stériles. De plus, l'ensemencement de levures en font les microorganismes prioritaires sur le milieu, cela a peut-être empêché d'autres bactéries présentes de croître sur les géloses. En réalisant les analyses une fois la bière conditionnée, un profil de brassage, de fermentation et de conditionnement étaient comparés et non plus deux temps d'ébullition. L'optimal aurait été de réaliser des analyses sur un échantillon de moût transféré chaud dans un contenant stérile puis refroidi pour les analyses.

Les valeurs de TAV relevées par l'appareil Alex 500 n'étaient pas en cohérence avec ceux obtenus en fin de fermentation. Le tableau ci-dessous résume les différences de résultats.

Tableau 12 : Récapitulatif et comparaison des TAV mesurés et calculés (Bellenguez.M, 2022)

	TAV calculé post fermentation	TAV mesuré post refermentation (Alex 500)	Ecart avant/après refermentation
45 minutes	4,17	4,44	0,27
60 minutes	4,67	4,74	0,07
Précision (+/-)		0,2	
Ecart TAV entre 60 et 45min	0,5	0,3	

L'écart de taux d'alcool entre les deux bières n'est pas le même entre le TAV mesuré et le TAV calculé. Lors de l'ajout du sucre à l'embouteillage, une refermentation s'opère et entraîne une augmentation du TAV. Le sucre ayant été ajouté à la même concentration pour les deux bières, l'écart de TAV présent avant refermentation égal à 0,5% aurait dû être le même après refermentation, or, ça n'est pas le cas : l'écart obtenu est de 0,3%.

De plus, en ajoutant le sucre à une concentration de 5g/L, le TAV est supposé augmenter de 0,25% soit un écart de 0,25% de TAV entre l'embouteillage et la refermentation. En revanche, celui-ci est égal à :

- 0,07% pour la bière à 60 minutes
- 0,27% pour La bière à 45 minutes

Ainsi, l'écart de TAV est cohérent pour la bière à 45 minutes (proche des 0,25%) mais ça n'est pas le cas pour la bière à 60 minutes. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les résultats obtenus par l'Alex 500.

#### **Hypothèse n°1 : une bière à 45 minutes réellement à 86% de rendement d'empâtage**

Durant le brassage, malgré l'utilisation de la même cuve et exactement des mêmes quantités d'ingrédients, le brassage de la bière à 45 minutes d'ébullition a obtenu 82% de rendement d'empâtage contre 86% pour celle bouillie durant 60 minutes. Les densité et TAV ont donc été recalculés en considérant 86% d'empâtage.

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

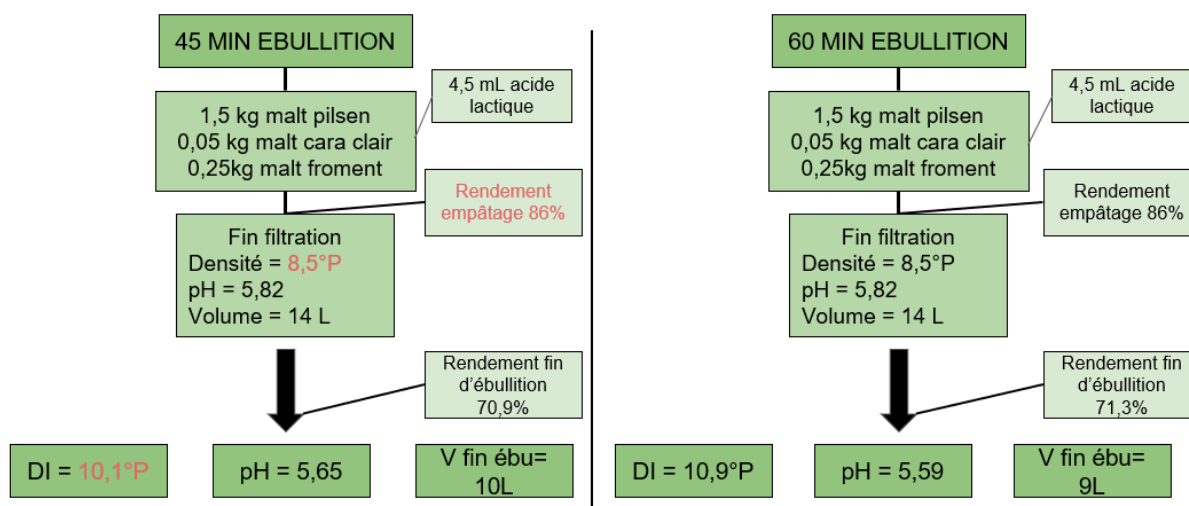


Figure 39 : Comparaison des deux brassages en considérant un rendement d'empâtage de 86% pour la bière 45 min (Bellenguez.M, 2022)

Sur la figure 39, les données variant avec un rendement d'empâtage de 86% sont en rouge. La densité initiale de la bière 45 minutes correspond désormais à l'extrait d'origine relevé par l'appareil Alex 500 soit environ 10,1°P (tableau 8 page 29).

Avec 86% d'empâtage, les données en fin de fermentation changent même si l'atténuation est conservée (même levure). Les données sont regroupées dans le tableau n°13 :

Tableau 13 : DI, DF et TAV de la bière 45 min avec un rendement d'empâtage de 86% (Bellenguez.M, 2022)

	45 minutes – 82%	45 minutes - 86%	60 minutes
Densité initiale (°P)	9,8	10,1	10,9
Densité finale (°P)	1,9	1,95	2,1
Atténuation (%)	81,14	81,14	81,31
TAV (%)	4,17	4,31	4,67

Il est intéressant de voir qu'en considérant un rendement d'empâtage de 86%, l'écart de TAV calculé en fin de fermentation n'est plus 0,5 mais 0,36% soit beaucoup plus proche de l'écart de 0,3% mesuré par l'appareil Alex 500. La première hypothèse considérerait donc un rendement d'empâtage de 86% pour la bière de 45 minutes et par conséquent une mesure de densité initiale fautive. Cependant, plusieurs éléments contredisent cette hypothèse :

- pour la bière 45 min à 82% de rendement, une différence de 1,7°P est observée entre la densité initiale et la densité pré-ébullition (figure 26, page 25). Théoriquement, un moût qui bout durant 45 minutes à un taux d'évaporation de 3L/h évapore 2,25L d'eau (voir calcul partie V.1, page 26). Cette évaporation donne une différence de 1,6°P entre la densité pré-ébullition et la densité initiale (calculs en annexe n°5, page 56). Les valeurs de densité mesurées lors du brassage sont cohérentes, cela ne peut correspondre avec l'hypothèse d'un rendement de 86% ;
- le TAV apporté par la refermentation n'est pas pris en compte dans les calculs de cette hypothèse.

Ainsi, cette hypothèse ne peut donc pas réellement être considérée.

### Hypothèse n°2 : prise en compte de la refermentation

Si l'alcool apporté par le sucre ajouté à l'embouteillage (0,25% en plus) est ajouté à chaque TAV avant refermentation, le TAV obtenu est :

- à 45 min = 4,17 + 0,25 = 4,42% ;
- à 60 min = 4,67 + 0,25 = 4,92%.

La valeur obtenue de 4,42% pour la bière 45 min est proche de celle mesurée par l'Alex 500 égale à 4,44%.

En revanche, pour la bière à 60 minutes, la valeur de TAV après refermentation calculée égale à 4,92% est loin des 4,74% mesurés par l'Alex 500.

### Hypothèse n°3 : précision de l'appareil Alex 500

L'appareil Alex 500 permet de donner des mesures de TAV avec une précision de +/-0,2%. Si la refermentation est considérée, les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 14 : Bilan des TAV calculés et mesurés et prise en compte des imprécisions de l'appareil Alex 500 (Bellenguez.M, 2022)

	TAV avant refermentation calculé (%)	TAV après refermentation calculé (%)	TAV mesuré Alex 500 (%)	Intervalle de précision +/-2%	Compris dans l'intervalle
<b>45 minutes 82%</b>	4,17	4,42	4,44	[4,24 ; 4,64]	Oui
<b>60 minutes</b>	4,67	4,92	4,74	[4,54 ; 4,94]	Oui

Ainsi, si les imprécisions de l'appareil Alex 500 sont considérées, les valeurs calculées sont en accord avec celles mesurées puisqu'elles se situent dans l'intervalle de précision. Cette hypothèse est donc valable. Ces calculs ont considéré que chaque bière avait reçu exactement la même quantité de sucre lors de l'embouteillage mais des imprécisions existent tout de même (balance, graduations du seau d'embouteillage...).

#### VI.1.2.2. Analyses complémentaires

Afin de réaliser une comparaison plus complète de ces deux bières, des analyses complémentaires qui n'ont pas été réalisées auraient pu être mises en place.

Même si les houblons ont été bouillis pendant 45 minutes, il aurait été intéressant d'analyser l'amertume (IBU) sur les deux bières. Si pour cette recette de bière, la réduction de l'ébullition ne semble pas avoir d'impact sensoriel, il aurait été intéressant de tester cette réduction sur plusieurs styles de bière différents : bières noires, bières plus amères...

De plus, l'ébullition étant responsable de la coagulation des protéines, de la stabilité colloïdale et donc du trouble de la bière. Une analyse de la turbidité aurait permis de déterminer l'impact de cette réduction d'ébullition sur la clarté de la bière. La stabilité colloïdale prend notamment tout son sens lors du vieillissement de la bière : avec le temps, une bière caractérisée par une mauvaise stabilité colloïdale devient trouble. Il pourrait être intéressant de mettre en place une analyse de vieillissement mesurant l'évolution de la turbidité, du pH, de la densité, du taux d'alcool dans le temps.

Enfin, étant donné qu'aucun faux goût lié au DMS n'ait été détecté durant l'analyse sensorielle, un dosage du DMS dans les deux bières aurait pu être réalisé pour voir si effectivement la bière bouillie 45 minutes possède une concentration plus élevée de ce composé.

### VI.1.3. La réduction de l'ébullition, une pratique à adopter ?

#### VI.1.3.1. Economies d'énergie versus utilisation de matières premières

Un temps d'ébullition réduit qui signifie économie d'énergie est aussi synonyme d'une extraction d'amertume et une concentration du moût plus faibles. Face à cela, une réduction du temps d'ébullition doit s'accompagner d'une augmentation de la quantité de houblon employée, cela représente 8,9% de houblon en plus avec une réduction de 15 minutes (annexe 6 page 57).

Pour l'amertume, la formule suivante permet de calculer la quantité de houblon ajoutée en début d'ébullition à mettre dans la recette en fonction du temps et de la masse de houblon de la recette initiale (détail des calculs en annexe 7, page 57) :

$$m1 = \frac{m2 \times (1 - e^{(-0,04 \times t2)})}{1 - e^{(-0,04 \times t1)}}$$

Où :

- t1 = temps d'ébullition de la nouvelle recette (minutes)
- m1 = masse de houblon correspondante au temps d'ébullition t1 (g)
- t2 = temps d'ébullition de la recette de référence (minutes)
- m2 = masse de houblon correspondante au temps d'ébullition t2 (g)

Ainsi, à partir d'une recette avec un temps d'ébullition de 60 minutes (t2) associé à une masse de houblon déterminée (m2 = 50g), le brasseur souhaitant réduire son temps d'ébullition à 45 minutes (t1) peut facilement calculer la nouvelle quantité de houblon à apporter (m1) :

$$m1 = \frac{50 \times (1 - e^{(-0,04 \times 60)})}{1 - e^{(-0,04 \times 45)}}$$
$$m1 = 54,5 \text{ g}$$

Cette formule fonctionne également si le brasseur souhaite augmenter son temps d'ébullition.

Comme le montrent les résultats de cette étude, une réduction du temps d'ébullition donne pour une même recette une densité initiale (concentration de sucres) plus faible. Ainsi, si le brasseur souhaite atteindre un moût de même densité initiale et même volume avec un temps d'ébullition réduit, il faudra augmenter la quantité de malt empâté pour avoir un moût plus dense mais avec un plus faible volume en sortie de cuve d'empâtage. Il est évident de penser dans un premier temps que cela reviendra plus cher pour le brasseur car il doit utiliser plus de matières premières, mais avec un temps d'ébullition réduit, les pertes par évaporation sont plus faibles et le volume de moût en sortie de cuve d'ébullition est aussi plus grand. Ainsi la quantité de malt utilisée pour un litre de moût produit est la même.

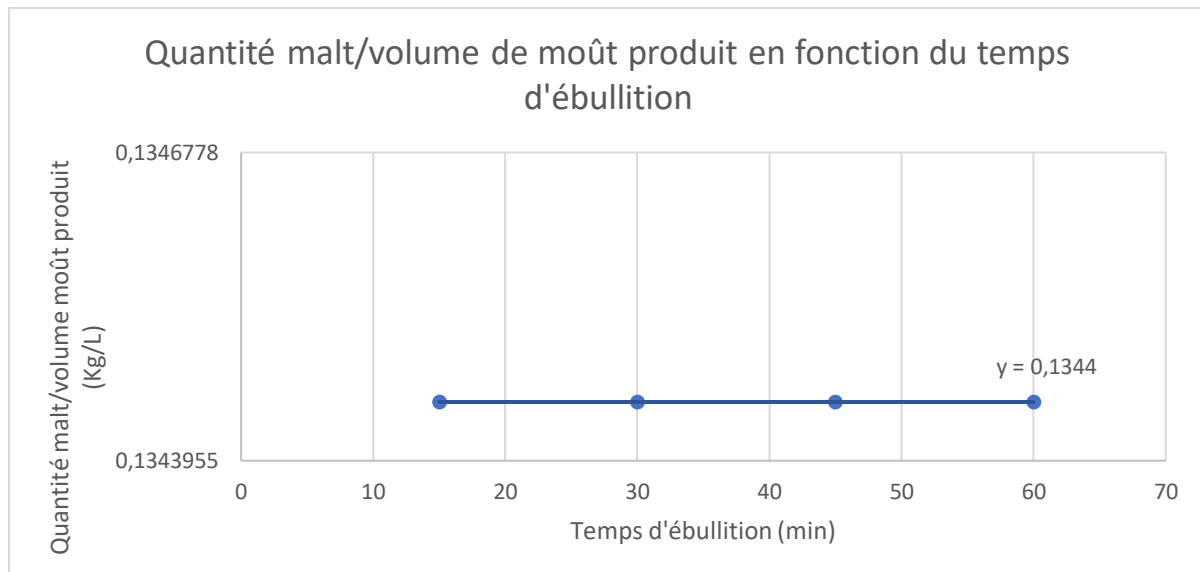


Figure 40 : Evolution du ratio quantité malt/volume de moût produit en fonction du temps d'ébullition (Bellenguez.M, 2022)

Ce graphique représente l'évolution de la quantité de malt nécessaire pour la production d'un volume de moût en fonction du temps d'ébullition de la recette.

La recette qui a été prise en exemple donnait un moût ayant un volume pré-ébullition de 23 litres avec une densité post-ébullition visée de 10°P. La quantité de malt est ainsi adaptée pour atteindre 10°P en prenant en compte la réduction de temps et donc un volume plus grand après ébullition. Selon les temps d'ébullition, la quantité de malt (kg) par litre de moût produit est constante.

Ceci confirme que peu importe le temps d'ébullition d'une recette, la quantité de malt pour produire un volume de moût déterminé à une densité donnée est toujours la même.

Il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'augmentation de la quantité de malt pour déterminer si la réduction du temps d'ébullition est rentable financièrement. Les méthodologies de calcul sont décrites en annexe n°8 page 59.

En revanche, ça n'est pas le cas pour le houblon puisque l'isomérisation dépend du temps d'ébullition. Ainsi une réduction de l'ébullition représente d'une part une économie d'énergie et donc moins de dépenses mais aussi une dépense supplémentaire en houblon.

Il est donc intéressant d'étudier jusque quel temps d'ébullition la réduction est intéressante financièrement.

La situation considérée est un brassin de 20 hl avec ajout de 1400g en début d'ébullition (équivalent à 30 IBU) de houblon Magnum à 18€HT/kg (Hop France, 2022). Le prix du gaz naturel étant très fluctuant en cette période actuelle il est très difficile de trouver une valeur moyenne. Il est donc considéré égal à 0,1325€/kWh (Commission de régulation de l'énergie, 2022). La figure 41 permet d'estimer le temps d'ébullition financièrement optimal dans cette situation.

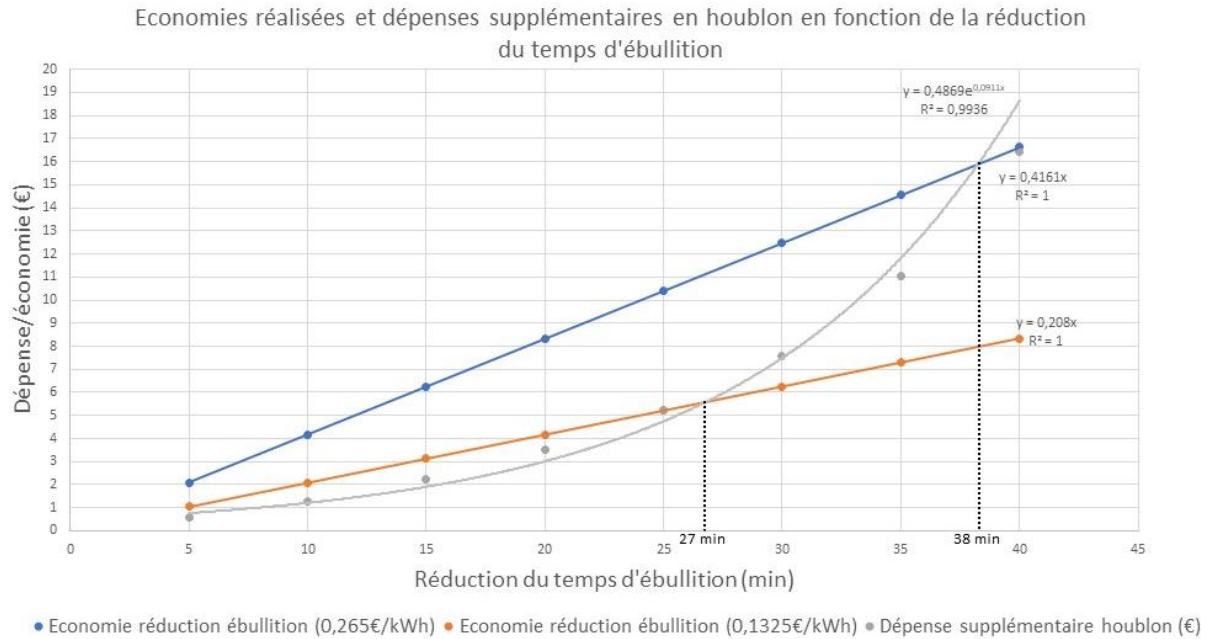


Figure 41 : Economies réalisées et dépenses supplémentaires en houblon en fonction de la réduction du temps d'ébullition (Bellenguez.M, 2022)

La figure 41 illustre les économies réalisées en fonction du temps de réduction de l'ébullition pour deux tarifs de gaz : 0,1325€/kWh (droite orange) et un tarif deux fois plus cher soit 0,265€/kWh (droite bleue). Elle illustre également les dépenses en houblon nécessaires pour compenser les pertes d'amertume lorsque le temps d'ébullition est réduit (courbe grise).

Les courbes orange et grise se croisent à un temps de réduction d'environ 27 minutes. A partir de ce point, pour un tarif de gaz de 0,1325€/kWh, l'économie réalisée par la réduction de l'ébullition est rattrapée par la dépense supplémentaire en houblon. Cela signifie que dans cette situation, il n'est financièrement pas judicieux de réduire le temps d'ébullition de plus de 27 minutes.

En considérant un tarif du gaz deux fois plus cher, l'économie réalisée en réduisant l'ébullition est plus grande. Cela a pour conséquence de déplacer le point d'intersection à 38 minutes : le brasseur peut donc se permettre de réduire son ébullition d'une durée, plus grande, égale à 38 minutes. Une fois ce temps dépassé, réduire le temps d'ébullition ne sera plus intéressant financièrement.

### VI.1.3.2. Temps d'ébullition et styles de bière

Ainsi, en sachant qu'une réduction du temps d'ébullition entraîne une couleur plus claire et une possibilité d'avoir plus de protéines en suspension, une réduction du temps d'ébullition peut être conseillée pour certains styles de bière.

Le style Hazy IPA<sup>41</sup>, très à la mode, caractérisé par une robe opaque, en est un exemple. Ce trouble naturel résulte de l'utilisation de grains très riches en protéines et de beaucoup de houblons. Les protéines présentes dans le grain vont s'associer aux polyphénols du houblon et restent en suspension. Ces bières sont de plus de couleur claire s'apparentant à un jus de fruits.

Pour renforcer ces deux aspects, réduire le temps d'ébullition peut être un bon choix pour :

- maximiser le trouble de la bière : moins de protéines sont coagulées et donc une plus grande quantité de protéines est disponible pour s'associer aux polyphénols ;

<sup>41</sup> India Pale Ale



- éclaircir la bière pour renforcer l'apparence de jus d'ananas/de pomme apprécié par les consommateurs de ce style.

Une réduction de 15 minutes d'ébullition est considérée mais celle-ci peut être poussée à 30 minutes pour encore plus de trouble.

De manière générale, les styles de bière clairs se prêtent à une réduction du temps d'ébullition : witbier, hefeweizen, berliner weisse, göse, american pale ale...

Néanmoins, le malt de base le plus souvent utilisé pour ces bières est le malt pilsen. Il faudra donc être vigilant au DMS et faire des essais en plus petit volume afin que celui-ci ne soit pas détectable par les consommateurs.

Une réduction du temps d'ébullition n'est cependant pas réellement bénéfique pour les bières noires comme les porters, stouts ou lagers foncées. Celles-ci bénéficient la plupart du temps de la saveur des produits de la réaction de Maillard qui s'associent bien aux malts torrifiés aux saveurs grillées, de café, de chocolat...

De plus, une couleur foncée est recherchée dans ces bières, il n'y a donc, en dehors des économies d'énergie, pas de réel intérêt à réduire l'ébullition dans ce cas. De plus, certaines bières de ces styles sont fortes en alcool : elles nécessitent parfois un temps d'ébullition plus long que 60 minutes pour obtenir un moût plus sucré avec l'utilisation de moins de malt en cuve d'empâtage.

## VI.2. D'autres façons d'économiser de l'énergie

### VI.2.1. Optimisation de la production : double brassin

Modifier des habitudes de production à l'échelle du brassage est solution pour réduire les consommations d'énergie. Néanmoins, une organisation plus judicieuse de la production est aussi possible en réalisant deux brassins à la suite durant la même journée. Cette méthode de production présente différents avantages :

- gain de temps : empâtage du 2<sup>ème</sup> brassin pendant l'ébullition du premier ;
- gain d'eau et d'énergie : un seul nettoyage des cuves pour deux brassins ;
- gain d'énergie : cuves déjà chaudes pour le 2<sup>ème</sup> brassin, utilisation de l'eau chaude du refroidissement pour le 2<sup>ème</sup> brassin...

Afin de comparer les gains d'énergie et de temps entre une journée de brassage avec un seul brassin et une journée compilant 2 brassins, la figure n°42 est réalisée. Celle-ci présente le déroulement de deux journées de brassage. Pour les calculs d'énergie, uniquement l'énergie nécessaire à la chauffe de l'eau pour les activités du brassage est calculée.

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

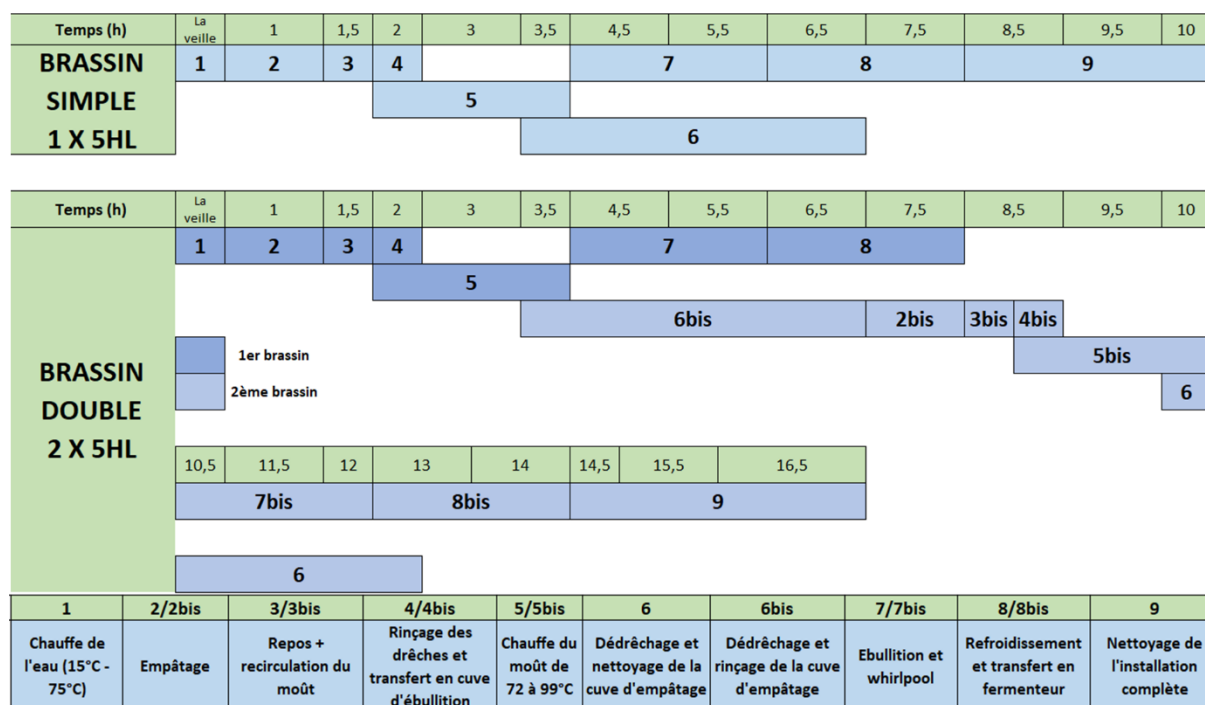


Figure 42 : Déroulement chronologique d'un brassin simple et d'un brassin double (Bellenguez.M, Dead Centre Brewing)

La production en double brassin permet de réaliser des tâches en temps masqué, par exemple, l'empâtage du deuxième brassage (2bis) est fait pendant le transfert en fermenteur du premier brassin. Un seul nettoyage de l'installation est fait pour une production deux fois plus grande. De plus, l'eau de refroidissement du premier brassin peut être utilisée pour l'empâtage et le rinçage des drêches du second brassin. Cela diminue la quantité d'eau à chauffer. Enfin, le temps nécessaire à un double brassin n'est pas égal au double du temps d'un brassin simple. Cette méthode de production optimise donc l'utilisation de l'eau, de l'énergie et du temps. Le tableau 15 propose une comparaison des consommations d'énergie, d'eau et de temps des deux types de brassins :

Tableau 15 : Economies d'énergie, de temps et d'eau réalisées grâce à un double brassin (Bellenguez.M, 2022)

	Brassin simple	Brassin double	Ecart	Réduction (%)
<b>Energie (kWh/hl produit)</b>	19,6	15,4	4,2	21,4
<b>Temps (h/hl produit)</b>	2	1,65	0,35	17,5
<b>Eau (l/hl produit)</b>	350	275	75	21,4

Ainsi, mettre en place une production par double brassin permet de réduire de 21,4% les consommations d'énergie et d'eau. Elle est aussi un gain de temps de 17,5%. Le détail des consommations de chaque étape du brassage est résumé à l'annexe n°9 page 60.

Aux économies d'énergie réalisées s'ajoutent des économies de consommations électriques des pompes du CIP qui sont divisés par deux.

Cette comparaison prend uniquement en compte les économies réalisées durant le brassage. Néanmoins, un double brassin permet aussi d'optimiser l'utilisation des fermenteurs. Dans un objectif d'économies de temps et d'énergie, il est plus judicieux de réaliser une session de brassage de 10 hl (double brassin) sur une journée plutôt que deux sessions de 5 hl sur deux jours différents. En prenant comme exemple deux fermenteurs d'une capacité de 10 hl chacun, deux journées de brassage de 5 hL permettent de remplir ces deux fermenteurs à moitié (1 brassin simple dans chaque fermenteur). En

revanche, un double brassin permet de remplir en une journée le fermenteur entièrement. Ainsi, dans le cas du double brassin, après embouteillage, un seul fermenteur est à nettoyer contre deux pour les brassins simples. Ainsi pour un même volume de 10 hl produit, le temps et les consommations d'énergie, d'eau et de produits de nettoyage sont divisés par deux. Cela permet aussi de laisser un fermenteur disponible pour un futur brassin.

### VI.2.2. Les raw beer : alternative à l'ébullition ?

Certaines brasseries dans le monde ont supprimé l'ébullition de leur processus de brassage pour brasser des bières appelées raw beer. Cette pratique est surtout courante dans le nord de l'Europe en Norvège, Suède, Danemark, Finlande... Pour ces bières, les étapes de brassage sont exactement les mêmes sauf pour l'ébullition qui est supprimée. Les houblons amérisants nécessaires à la stabilité microbiologique de la bière ne sont donc plus ajoutés. Ils peuvent alors être directement ajoutés à l'empâtage ou infusés dans de l'eau bouillante au préalable puis ajoutés au moût.

Ainsi, brasser une raw beer représente un gain d'énergie puisque l'étape d'ébullition est supprimée. De plus, la température du moût se finissant à une température inférieure à 100°C en fin de brassage, le refroidissement est moins long et consomme moins d'eau. Enfin, cela représente aussi un gain de temps puisqu'une heure est supprimée du processus de brassage et les consommations de temps associées notamment le refroidissement. Faire 2 brassins d'affilé tout en réduisant le temps de la journée de brassage est donc plus facile.

Néanmoins, cette pratique est plus risquée au niveau de la stabilité microbiologique et colloïdale de la bière. Elle ne correspond pas à certains styles de bières à robe claire comme les lagers ou à des bières très amères pour lesquelles l'ébullition est utile pour avoir leur amertume. De plus, les qualités sensorielles d'une raw beer sont sûrement différentes d'une bière bouillie 60 minutes pour une même recette.

## VII. Conclusion

Les résultats de cette étude ont permis de montrer qu'une réduction de 15 minutes du temps d'ébullition produisait une bière plus claire. La différence d'EBC qui a été observée à travers cette étude s'élevait à 0,38. Pour adapter une recette de bière initialement bouillie durant 60 minutes à une ébullition de 45 minutes, plusieurs modifications devront être apportées. La première est l'augmentation de la quantité de houblons pour compenser les pertes d'amertume. Cette augmentation est estimée à 8,9% pour une réduction de 15 minutes. De plus, il est nécessaire de prendre en compte des pertes d'eau par évaporation plus faibles durant l'ébullition. Cela dépendra du taux d'évaporation de l'installation de brassage, plus celui-ci est grand et plus les différences d'évaporation seront grandes. Pour pallier ça, la recette devra être configurée de telle sorte à produire un volume de moût plus faible mais plus dense en sortie de cuve d'empâtage. Pour une bière avec les mêmes caractéristiques (densités et TAV) et à volume produit égal, la quantité de malt utilisé pour 45 minutes d'ébullition reste cependant la même, seuls le volume d'eau et la quantité de houblons varient.

La réduction du temps d'ébullition a montré une économie d'énergie significative à l'échelle d'une production annuelle de 4000 hl (200 brassins). Elle est estimée à 10% de la consommation énergétique nécessaire à 200 brassages. Cela représente un gain énergétique équivalent à 20 brassins soit 40 000 l de bière. Cela s'explique notamment par le fait que l'ébullition soit l'étape la plus énergivore du brassage.

Néanmoins, la décision de réduire l'ébullition à 45 minutes doit être réfléchie. Elle demeure une bonne solution avec les prix de l'énergie élevés et leur augmentation. Cependant, la hausse des dépenses due à l'utilisation de plus de houblon doit être prise en compte.

Si cette modification du processus de brassage peut être bénéfique pour certains styles de bières comme les Hazy IPA en maximisant leur robe trouble naturel, elle n'a pas forcément d'impact sensoriel. La différence sensorielle majeure étant la couleur, une réduction du temps d'ébullition sera difficilement détectable sur des bières foncées ou à base de fruits par exemple. De ce fait, cette modification des pratiques peut être appliquée à une grande variété de styles de bière. Une attention devra être portée à la formation de DMS pour les bières brassées avec une forte proportion de malt Pilsen. En revanche, une ébullition réduite risque de ne pas convenir aux bières à un haut niveau d'IBU étant donné la quantité de houblon amérisant nécessaire.

Ainsi, la réduction du temps d'ébullition est une bonne solution d'économie d'énergie que toutes les brasseries peuvent directement mettre en place dans le climat géopolitique actuel.

Etant donné que les prix de l'énergie continuent d'augmenter et qu'une réduction de 15 minutes de l'ébullition est facilement envisageable, il serait pertinent d'étudier l'impact de réductions d'ébullition plus importantes et sur des styles de bière différents. Une analyse sensorielle poussée, associée à des mesures d'EBC et de concentration en DMS pour chaque réduction pourraient être effectuées. Les raw beer, brassées sans ébullition, demeurent également un sujet intéressant à approfondir.

La consommation d'énergie durant l'ébullition dépend de sa durée mais aussi fortement du taux d'évaporation. L'intensité de la chauffe doit être telle que le taux d'évaporation soit minimisé mais suffisant pour permettre une bonne coagulation des protéines et une évaporation de DMS suffisante. En dehors d'une modification du processus de brassage en lui-même, les économies d'énergie en brasserie sont aussi fortement dépendantes de l'installation, de son isolation thermique qui permet de minimiser les pertes de chaleur. Pour économiser davantage d'énergie, les opportunités de récupération d'énergie ne sont pas à négliger : récupération d'eau chaude lors du refroidissement, récupération des vapeurs d'ébullition. L'ébullition peut aussi être menée de différentes manières :

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

ébullition sous faible pression ou ébullition avec une chauffe à l'intérieur de la cuve en contact avec le moût par exemple.

L'économie d'énergie peut aussi s'organiser à l'échelle de la production, notamment en réalisant deux brassins à la suite permettant d'économiser de l'énergie, du temps et de l'eau.

Ainsi, la réduction du temps d'ébullition est une première étape de diminution de l'énergie consommée par le processus de brassage. En dehors d'un aspect financier, la réduction d'énergie consommée diminue aussi l'impact environnemental de la production de bière, le climat actuel appelant à la sobriété énergétique. Néanmoins, les étapes du cycle de vie de la bière les plus impactantes sur l'environnement ne concernent pas le processus de brassage (P. Melon, et al., 2012). Elles concernent plutôt l'emballage et la culture de l'orge pour le malt. Ainsi, les efforts doivent être réalisés en amont, en s'approvisionnant chez les malteries, houblonnières locales et en fin de production avec l'utilisation de fûts inox réutilisables, la mise en place de la consigne pour les bouteilles en verre ou l'utilisation de canettes en aluminium.

## VIII. Références bibliographiques

- (s.d.). Récupéré sur Brewing Theory: <https://brewingtheory.com/>
- AgroParisTech. (s.d.). *Les tests triangulaires*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur [http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/Test\\_triangulaire.pdf](http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/Test_triangulaire.pdf)
- Alpha bière. (2018, Décembre 25). *Guide des faux goûts : diméthylsulfure (DMS)*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur Alpha bière: <https://www.alphabiere.fr/2018/12/25/guide-des-faux-gouts-dms/>
- Anton Paar. (s.d.). *Alcool mètre et analyseur d'extrait Alex 500*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur Anton Paar: <https://www.anton-paar.com/fr-fr/produits/details/alcool-metre-et-analyseur-d'extrait-alex-500/>
- Anton Paar;. (s.d.). *Analyseur de CO2 et d'oxygène portables : CboxQC*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur Anton Paar: <https://www.anton-paar.com/fr-fr/produits/details/cboxqc/>
- Avisé. (2019, Mars 22). *La brasserie artisanale, une croissance qui ne se dément pas*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Avisé: <https://www.avise-info.fr/alimentaire/la-brasserie-artisanale-une-croissance-qui-ne-se-dement-pas#:~:text=Selon%20les%20chiffres%20de%20l,en%20France%20y%20sont%20produites.>
- Bamforth, C. (2013). *Dimethyl Sulfide - Significance, Origins and Control*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur [https://escholarship.org/content/qt14155572/qt14155572\\_noSplash\\_cb377d06d81f26d0ba28725f221e7108.pdf?t=omsuov](https://escholarship.org/content/qt14155572/qt14155572_noSplash_cb377d06d81f26d0ba28725f221e7108.pdf?t=omsuov)
- Bières de France. (s.d.). *Le marché de la bière en France*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Bières de France: <https://bieresdefrance.fr/fr/blog/post/le-marche-de-la-biere-en-france.html>
- BJCP. (s.d.). *Introduction to the BJCP*. Consulté le Septembre 13, 2022, sur BJCP: <https://www.bjcp.org/about/introduction-bjcp/>
- Brasseurs de France. (s.d.). *Une filière d'excellence : la brasserie française*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Brasseurs de France: <https://www.brassieurs-de-france.com/tout-savoir-sur-la-biere/le-marche-de-la-biere/>
- Brewers journal. (2017, Mai 18). *Science Maillaird Reaction*. Consulté le Septembre 12, 2022, sur Brewers journal: <https://www.brewersjournal.ca/2017/05/18/science-malliard-reaction/>
- BtoBeer. (2016, Octobre 20). *Bien choisir son eau de brassage*. Consulté le Septembre 7, 2022, sur BtoBeer: <https://www.btobeer.com/themes-conseils-techniques-bieres-brasseries/zythologie/bien-choisir-son-eau-de-brassage>
- BtoBeer. (2017, Octobre 31). *Le choix du houblon pour la bière : de la chimie aux saveurs*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur BtoBeer: <https://www.btobeer.com/themes-conseils-techniques-bieres-brasseries/zythologie/le-choix-du-houblon-pour-la-biere-de-la-chimie-aux-saveurs>
- BtoBeer. (2018, Mars 12). *Plongée dans la carbonatation : introduction aux techniques*. Consulté le Septembre 8, 2022, sur BtoBeer: <https://www.btobeer.com/themes-conseils-techniques-bieres-brasseries/zythologie/plongee-dans-la-carbonatation-introduction-aux-techniques>

bieres-brasseries/conseils-carbonatation-process-et-analyses/plongee-dans-les-techniques-de-carbonatation-biere

Btobeer. (2021, Janvier 13). *Les principales levures sauvages d'altération de la bière - Dossier Les flores d'altération de la bière partie 3*. Consulté le Septembre 25, 2022, sur Btobeer: <https://www.btobeer.com/themes-conseils-techniques-bieres-brasseries/conseils-carbonatation-process-et-analyses/les-principales-levures-sauvages-d-alteration-de-la-biere-flores-d-alteration>

Btobeer. (s.d.). *Houblon aramis*. Consulté le Septembre 7, 2022, sur Btobeer: <https://www.btobeer.com/materiels-fournitures-brasserie/catalogue-houblons/houblon-aramis-cones-pellets>

Carl Roth. (s.d.). *MRS agar*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur Carl Roth: <https://www.carlroth.com/fr/fr/milieus-de-culture-pour-lactobacilli-bacilli/mrs-agar/p/x924.1>

Chimix. (2022, Octobre 2). *Flux thermique à travers une gaine cylindrique : loi de Fourier*. Récupéré sur Chimix.

CNRTL. (s.d.). *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales*. Récupéré sur CNRTL: <https://www.cnrtl.fr/>

Collin, S., & De Clerck, J. (2022). *Traité de brasserie tome 1 : La bière et ses matières premières*. (Dunod, Éd.)

Comission de régulation de l'énergie. (2022). *Les prix à terme de l'électricité pour l'hiver 2022-2023 et l'année 2023*. Consulté le Septembre 12, 2022, sur Comission de régulation de l'énergie.

Commision de régulation de l'énergie. (2022, Octobre 6). *Publication des barèmes applicables pour les tarifs réglementés de vente de gaz naturel d'Engie- Octobre 2022*. Récupéré sur Comission de régulation de l'énergie: <https://www.cre.fr/Actualites/publication-des-baremes-applicables-pour-les-tarifs-reglementes-de-vente-de-gaz-naturel-d-engie-octobre-2022>

Conseil de l'union européenne. (2022, Septembre 30). *Impact de l'invasion de l'Ukraine par la Russie sur les marchés : réaction de l'UE*. Consulté le Septembre 12, 2022, sur Conseil de l'Union européenne: <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/eu-response-ukraine-invasion/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/>

Craft Beer & Brewing. (s.d.). *Bottom fermentation*. Consulté le Octobre 3, 2022, sur Craft Beer & Brewing: [https://beerandbrewing.com/dictionary/?hPP=20&idx=prod\\_unfiltered&p=0&is\\_v=1&q=bottom%20fermentation](https://beerandbrewing.com/dictionary/?hPP=20&idx=prod_unfiltered&p=0&is_v=1&q=bottom%20fermentation)

Craft Beer & Brewing. (s.d.). *Color units EBC*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur Craft Beer & Brewing: [https://beerandbrewing.com/dictionary/CFyIStygOs/#:~:text=Color%20Units%20Ebc%20\(European%20Brewery,measured%20in%20a%20technical%20manner.](https://beerandbrewing.com/dictionary/CFyIStygOs/#:~:text=Color%20Units%20Ebc%20(European%20Brewery,measured%20in%20a%20technical%20manner.)

Drprabhurajeshwar. (2018, Octobre). *Microscopic observation of Gram's stained Lactobacillus spp*. Consulté le Septembre 25, 2022, sur ResearchGate: [researchgate.net/figure/Microscopic-observation-of-Grams-stained-Lactobacillus-spp\\_fig1\\_328454272](https://www.researchgate.net/figure/Microscopic-observation-of-Grams-stained-Lactobacillus-spp_fig1_328454272)

- Fermentis. (s.d.). *Tips and tricks : A brewer's guide to active dry yeast & fermentation*. Consulté le Septembre 8, 2022, sur Fermentis: <https://fermentis.com/fr/centre-connaissances/biere-conseils-astuces/>
- Fink, W. (2017). *A preliminary investigation of the chemistry of the hops : methods for extraction and alpha acid isomerization kinetics*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur Semantic scholar: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-preliminary-investigation-of-the-chemistry-of-for-Fink/2daa01f1d796ebb8cf4ebad12278d08e85e2a477/figure/2>
- Fix, G. (2000). *Principles of Brewing Science*.
- Futura sciences. (s.d.). *Isomère : qu'est-ce que c'est ?* Consulté le Septembre 10, 2022, sur Futura sciences: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-isomere-757/>
- Futura sciences. (s.d.). *Les différentes bactéries, Gram et sa coloration*. Consulté le Octobre 4, 2022, sur Futura sciences: <https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-bacteries-microbes-tout-genre-704/page/3/>
- Futura sciences. (s.d.). *Saccharomyces cerevisiae : qu'est-ce que c'est ?* Consulté le Septembre 7, 2022, sur Futura sciences: <https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-saccharomyces-cerevisiae-8340/>
- Gaudiaut, T. (2021, Août 13). *Le boom des microbrasseries en France*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Statista: <https://fr.statista.com/infographie/19362/evolution-du-nombre-de-brasseries-et-microbrasseries-en-france/#:~:text=Comme%20le%20montre%20notre%20infographie,de%20504%20%C3%A0%201%20650.>
- Gomez, G. (s.d.). *Réaction de maillard*. Récupéré sur Académie de Montpellier: <https://tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille10/MAILLARD.htm#UN>
- Gouvernement du Canada;. (s.d.). *Fiche technique Santé-Sécurité : Agents pathogène - Lactobacillus spp*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur Gouvernement du Canada: <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete-laboratoire/fiches-techniques-sante-securite-agents-pathogenes-evaluation-risques/lactobacillus.html>
- Green, D. (2008, Février). *The science of step mashing*. Consulté le Septembre 7, 2022, sur Brew your own: <https://byo.com/article/the-science-of-step-mashing/>
- Hollandwolfgang, J., & Lindell, D. (s.d.). *Malting*. Consulté le Septembre 7, 2022, sur Craft beer & brewing: <https://beerandbrewing.com/dictionary/kJavT7eNYH/>
- Hop France. (2022, Octobre 6). *Magnum Hallertau Pellet T90*. Récupéré sur [https://www.comptoir-houblon.fr/houblons-aromatiques-alsace/355-magnum-hallertau-de-pellet-t90.html#/27-conditionnement-5\\_kg/82-millesime-2021/197-alpha-1690](https://www.comptoir-houblon.fr/houblons-aromatiques-alsace/355-magnum-hallertau-de-pellet-t90.html#/27-conditionnement-5_kg/82-millesime-2021/197-alpha-1690)
- Hoplist. (s.d.). *Tettnanger*. Consulté le Septembre 2022, sur Hoplist: <https://www.hoplist.com/hops/aroma-hops/tettnang-tettnanger/>
- Institut Agro Rennes-Angers. (s.d.). *Evaluation sensorielle des aliments*. Consulté le Septembre 14, 2022, sur [https://tice.agrocampus-ouest.fr/pluginfile.php/114073/mod\\_resource/content/2/M1\\_Evalsens\\_UC\\_Sensom%C3%A9rie\\_2022.pdf](https://tice.agrocampus-ouest.fr/pluginfile.php/114073/mod_resource/content/2/M1_Evalsens_UC_Sensom%C3%A9rie_2022.pdf)



## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

- Isover. (2022, Octobre 6). *Les isolants en laine de roche*. Récupéré sur Isover Saint-Gobain: <https://www.isover.fr/guides/materiaux-isolants/les-isolants-en-laine-de-roche#:~:text=La%20conductivit%C3%A9%20thermique%20de%20la,laine%20de%20roche%20en%20vrac>.
- Janish, S. (s.d.). *How to prevent DMS in beer*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur Scott Janish: <https://scottjanish.com/how-to-prevent-dms-in-beer/#:~:text=What%20is%20DMS%3F,embryo%20of%20barley%20during%20germination>
- Kirin Brewery Company. (s.d.). *Global Beer Consumption by country in 2020*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Kirin holdings: [https://www.kirinholdings.com/en/newsroom/release/2022/0127\\_04.html#:~:text=In%202020%2C%20the%20global%20beer,20.2%20billion%20633%20ml%20bottles](https://www.kirinholdings.com/en/newsroom/release/2022/0127_04.html#:~:text=In%202020%2C%20the%20global%20beer,20.2%20billion%20633%20ml%20bottles).
- Lallemand brewing. (2022, Septembre 13). *Levure de bière de style ale nottingham performance lalbrew*. Récupéré sur Lallemand brewing: <https://www.lallemandbrewing.com/fr/canada/details-du-produit/levure-de-biere-de-style-ale-nottingham-performance-lalbrew/>
- Larousse. (s.d.). Récupéré sur Larousse: <https://www.larousse.fr/>
- Le Parisien. (2022, Mai 30). *Guerre en ukraine : chronologie d'une invasion*. Consulté le Septembre 12, 2022, sur Le parisien: <https://www.leparisien.fr/international/guerre-en-ukraine-chronologie-dun-conflit-en-quatre-dates-04-03-2022-ANMFE3WI6ZAIBKXRNQ2VLADJI.php>
- Lesaffre. (2020, Juin 15). *A la rencontre de Saccharomyces cerevisiae*. Consulté le Septembre 7, 2022, sur Lesaffre: <https://www.lesaffre.com/fr/trends-mag/a-la-rencontre-de-saccharomyces-cerevisiae/>
- Lycée Denis Diderot. (2022, Octobre 2). *Propagation de la chaleur*. Récupéré sur Lycée Denis Diderot Académie d'Aix-Marseille.
- Maillet, A. (s.d.). *Quelle quantité d'extrait ou de malts a utiliser pour brasser sa bière artisanale*. Consulté le Octobre 2, 2022, sur Saveur bière: <https://help.saveur-biere.com/l/fr/article/rxpfcuij9x-quelle-quantit-d-extrait-ou-de-malts-utiliser-pour-brasser-sa-bi-re>
- Murphy and son. (s.d.). *The malting process*. Consulté le Septembre 6, 2022, sur Murphy and son: <https://www.murphyandson.co.uk/resources/technical-articles/the-malting-process/>
- National Library of Medicine. (2012). *Polyphenols*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur NCBI: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/?term=Polyphenols>
- OCDE. (2022, Mars). *Guerre en Ukraine : Conséquences économiques et sociales et implications pour les politiques publiques*. Consulté le Septembre 12, 2022, sur OECD ilibrary: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/f111a540-fr/index.html?itemId=/content/publication/f111a540-fr>
- P. Melon, R., Wergifosse, V., Renzoni, R., & F. Léonard, A. (2012). *Analyse du cycle de vie d'une bière blonde belge artisanale*. Récupéré sur Avnir: [http://avnir.org/documentation/book/LCAconf\\_melon\\_2012\\_fr.pdf](http://avnir.org/documentation/book/LCAconf_melon_2012_fr.pdf)
- Palmer, J. (2017). *How to Brew*. Consulté le Septembre 8, 2022

## Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

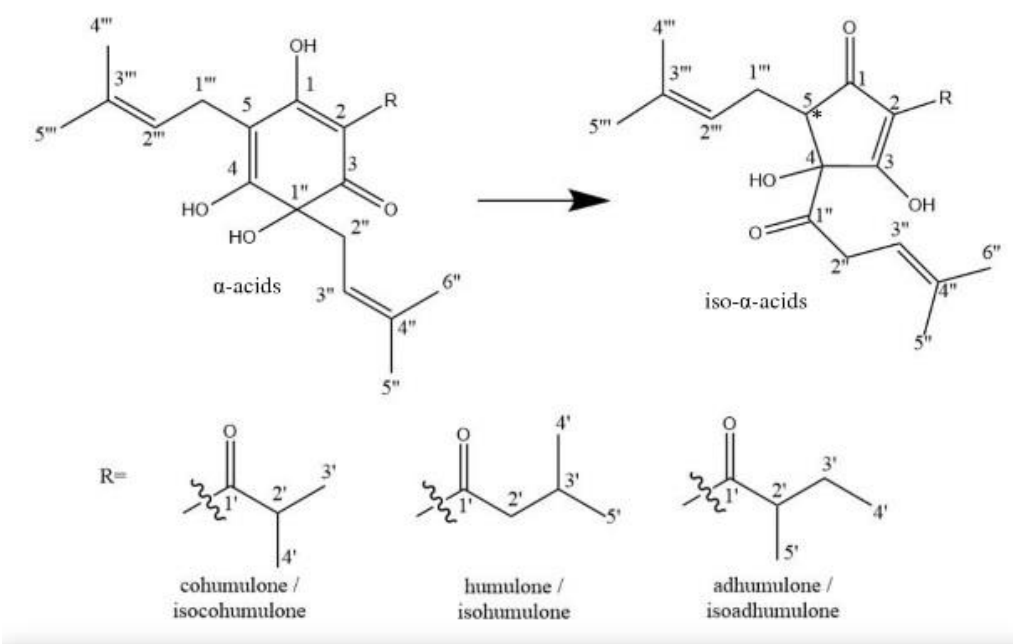
- Penot, M. (2021, Mai 21). *Biologie du vin et de la bière*. Consulté le Septembre 8, 2022, sur Planet Vie: <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/microbiologie/biologie-du-vin-et-de-la-biere#:~:text=La%20fermentation%20alcoolique%20est%20la,de%20raisin%20et%20de%20bi%C3%A8re.>
- Salanta, L. C., Coldea, T. E., Ignat, M. V., Pop, C. R., Tofana, M., Mudura, E., . . . Zhao, H. (2020, Octobre 30). *Non-Alcoholic and Craft Beer production and challenges*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Mdpi: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1382>
- Saveur bière. (s.d.). *Quelle quantité d'extrait ou de malts utiliser pour brasser sa bière*. Récupéré sur Saveur bière: <https://help.saveur-biere.com/l/fr/article/rxpfcij9x-quelle-quantit-d-extrait-ou-de-malts-utiliser-pour-brasser-sa-bi-re>
- Scheller, L., Michel, R., & Funk, U. (2008). *Efficient Use of Energy in the brewhouse*. Consulté le Septembre 13, 2022, sur <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.4747&rep=rep1&type=pdf>
- Smith, B. (2012, Avril 10). *Dimethyl Sulfides (DMS) in home brewed beer*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur BeerSmith: <http://beersmith.com/blog/2012/04/10/dimethyl-sulfides-dms-in-home-brewed-beer/>
- Soufflet. (2019, Juin 28). *Savez-vous comment malter de l'orge ?* Consulté le Septembre 6, 2022, sur Groupe Soufflet: <https://www.soufflet.com/fr/savez-vous-comment-malter-de-l-orge>
- ThermoFisher Scientific. (s.d.). *Milieux de culture déshydratés Lysine*. Consulté le Septembre 25, 2022, sur ThermoFisher Scientific: [http://www.oxid.com/UK/blue/prod\\_detail/prod\\_detail.asp?pr=CM0191&org=149&c=UK&lang=FR](http://www.oxid.com/UK/blue/prod_detail/prod_detail.asp?pr=CM0191&org=149&c=UK&lang=FR)
- Univers bière. (s.d.). *Biochimie : la cuisson du moût*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur Univers bières: [http://univers-biere.net/bio\\_cuisson.php](http://univers-biere.net/bio_cuisson.php)
- Univers bière. (s.d.). *Fermentation basse*. Consulté le Octobre 3, 2022, sur Univers bière: [http://univers-biere.net/ferment\\_basse.php](http://univers-biere.net/ferment_basse.php)
- Univers bière. (s.d.). *Les techniques de houblonnage - First Wort Hopping*. Consulté le Septembre 10, 2022, sur Univers bière: [http://univers-biere.net/tec\\_fwh.php](http://univers-biere.net/tec_fwh.php)
- Univers bière;. (s.d.). *Fermentation Haute*. Consulté le Octobre 3, 2022, sur Univers bière: [http://univers-biere.net/ferment\\_haute.php#:~:text=La%20fermentation%20haute%20est%20un,alcool%20et%20en%20gaz%20carbonique](http://univers-biere.net/ferment_haute.php#:~:text=La%20fermentation%20haute%20est%20un,alcool%20et%20en%20gaz%20carbonique)
- Universalis. (s.d.). *Coloration de Gram*. Consulté le Octobre 4, 2022, sur Universalis: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/coloration-de-gram/>
- Vazquez, C. (2021, Août 7). *La bière artisanale fait mousser les Français*. Consulté le Septembre 2, 2022, sur Le Figaro: <https://www.lefigaro.fr/conso/la-biere-artisanale-fait-mousser-les-francais-20210806>

## IX. Liste des annexes

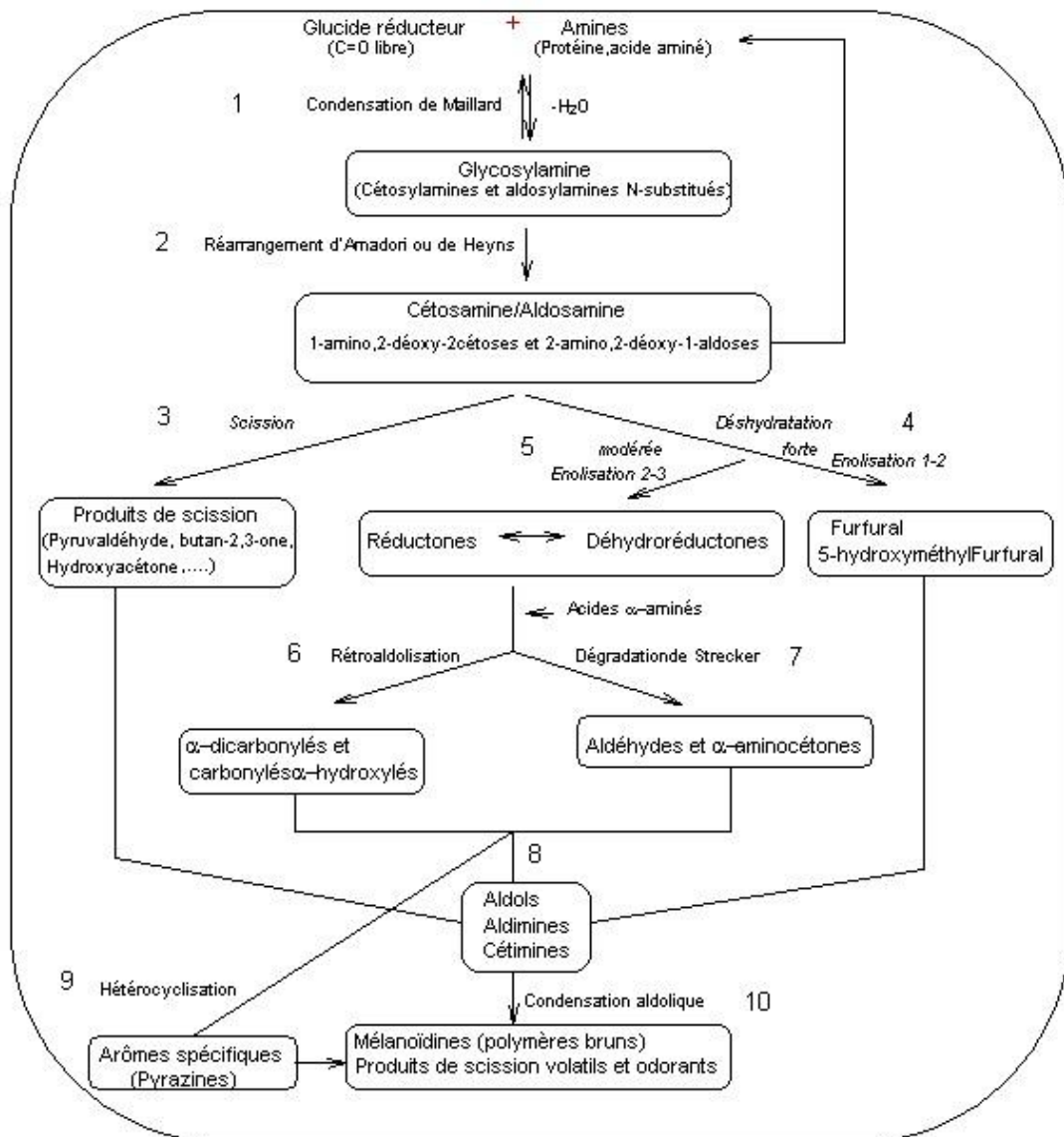
ANNEXE 1 : ISOMERISATION DES ACIDES ALPHA (W.FINK, 2017) .....	53
ANNEXE 2 : REACTION DE MAILLARD SIMPLIFIEE (GOMEZ.G) .....	54
ANNEXE 3 : DIAGRAMME DE GANTT COMPLET (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	55
ANNEXE 4 : RESUME DU STYLE BLONDE ALE (GUIDE BJCP, 2021) .....	56
ANNEXE 5 : CALCULS HYPOTHESE N°1 (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	56
ANNEXE 6 : QUANTITE DE HOUBLON SUPPLEMENTAIRE A AJOUTER EN FONCTION DE LA REDUCTION DU TEMPS D'EBULLITION (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	57
ANNEXE 7 : DEMONSTRATION POUR LE CALCUL DE L'AMERTUME EN FONCTION DE DEUX TEMPS D'EBULLITION (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	57
ANNEXE 8 : RATIO QUANTITE DE MALT/VOLUME MOUT PRODUIT (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	59
ANNEXE 9 : DETAIL DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE, D'EAU ET DE TEMPS POUR DEUX METHODES DE PRODUCTION EN BRASSERIE (BELLENGUEZ.M, DEAD CENTRE BREWING).....	60

# X. Annexes

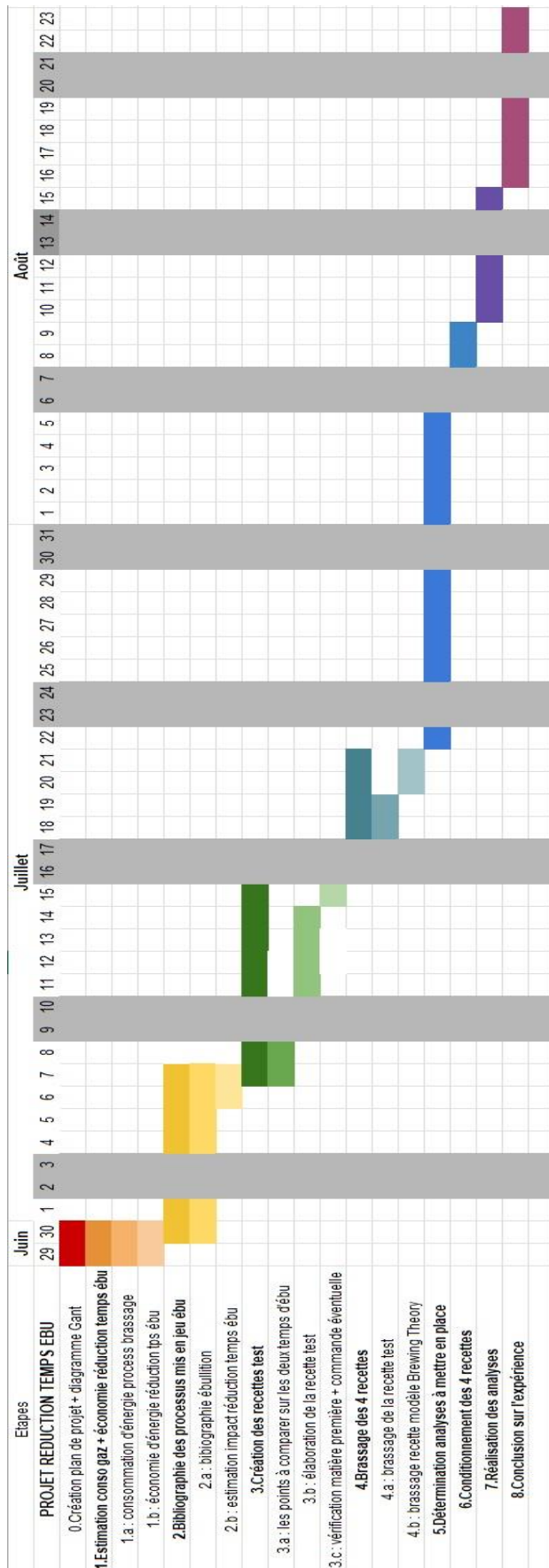
Annexe 1 : Isomérisation des acides alpha (W.Fink, 2017)



Annexe 2 : Réaction de Maillard simplifiée (Gomez.G)



Annexe 3 : Diagramme de Gantt complet (Bellenguez.M, 2022)



Annexe 4 : Résumé du style Blonde Ale (Guide BJCP, 2021)

**18A. Blonde Ale**

**Overall Impression:** Easy-drinking, approachable, malt-oriented American craft beer, often with interesting fruit, hop, or character malt notes. Well-balanced and clean, is a refreshing pint without aggressive flavors.

**Aroma:** Light to moderate malty aroma, generally neutral or grainy, possibly with a light bread or caramel note. Low to moderate fruitiness is optional, but acceptable. May have a low to medium hop aroma, and can reflect almost any hop variety although citrusy, floral, fruity, and spicy notes are common. Clean fermentation profile.

**Appearance:** Light yellow to deep gold in color. Clear to brilliant. Low to medium white head with fair to good retention.

**Flavor:** Initial soft maltiness, but can also have light character malt flavor (e.g., bread, toast, biscuit, wheat). Caramel flavors usually absent; if present, they are typically low-color caramel or honey notes. Low to medium fruity esters optional, but are welcome. Light to moderate hop flavor (any variety), but shouldn't be overly aggressive. Medium-low to medium bitterness, but the balance is normally towards the malt or even between malt and hops. Finishes medium-dry to slightly malty; an impression of sweetness is often an expression of lower bitterness than actual residual sweetness. Clean fermentation profile.

**Mouthfeel:** Medium-light to medium body. Medium to high carbonation. Smooth without being heavy.

**Comments:** Oxidized versions can develop caramel or honey notes, which should not be mistaken for similar malt-derived flavors. Sometimes known as Golden Ale or simply a Gold.

**History:** An American craft beer style produced as a faster-produced alternative to standard American lagers. First believed to be produced in 1987 at Catamount. Often positioned as an entry-level house ale.

**Characteristic Ingredients:** Generally all-malt, but can include wheat malt or sugar adjuncts. Any hop variety can be used. Clean American, lightly fruity English, or Kölsch yeast. May also be made with lager yeast, or cold-conditioned.

**Style Comparison:** Typically has more flavor than American Lager and Cream Ale. Less bitterness than an American Pale Ale. Perhaps similar to some maltier examples of Kölsch.

**Vital Statistics:** OG: 1.038 – 1.054  
IBUs: 15 – 28 FG: 1.008 – 1.013  
SRM: 3 – 6 ABV: 3.8 – 5.5%

**Commercial Examples:** Firestone Walker 805, Kona Big Wave Golden Ale, Real Ale Firemans #4 Blonde Ale, Russian River Aud Blonde, Victory Summer Love, Widmer Citra Summer Blonde Brew

**Tags:** standard-strength, pale-color, any-fermentation, north-america, craft-style, pale-ale-family, balanced

**18B. American Pale Ale**

**Overall Impression:** An average-strength, hop-forward, pale American craft beer with sufficient supporting malt to make the beer balanced and drinkable. The clean hop presence can reflect classic or modern American or New World hop varieties with a wide range of characteristics.

**Aroma:** Moderate to moderately-high hop aroma from American or New World hop varieties with a wide range of possible characteristics, including citrus, floral, pine, resin, spice, tropical fruit, stone fruit, berry, or melon. None of these specific characteristics are required, but a hoppy aroma should be apparent. Low to moderate neutral to grainy maltiness supports the hop presentation, and can show low amounts of specialty malt character (e.g., bread, toast, biscuit, caramel). Fruity esters optional, up to moderate in strength. Fresh dry-hop aroma optional.

**Appearance:** Pale golden to amber. Moderately large white to off-white head with good retention. Generally quite clear.

**Flavor:** Hop and malt character similar to aroma (same intensities and descriptors apply). Caramel flavors are often absent or fairly restrained, but are acceptable as long as they don't clash with the hops. Moderate to high bitterness. Clean fermentation profile. Fruity yeast esters can be moderate to none, although many hop varieties are quite fruity. Medium to dry finish. The balance is typically towards the late hops and bitterness; the malt presence should be supportive, not distracting. Hop flavor and bitterness often linger into the finish, but the aftertaste should generally be clean and not harsh. Fresh dry-hop flavor optional.

**Mouthfeel:** Medium-light to medium body. Moderate to high carbonation. Overall smooth finish without astringency or harshness.

**Comments:** Modern American versions are often just lower gravity IPAs. Traditionally was a style that allowed for experimentation with hop varieties and usage methods, which can now often be found as international adaptations in countries with an emerging craft beer market. Judges should allow for characteristics of modern American or New World hops as they are developed and released.

**History:** A modern American craft beer era adaptation of English pale ale, reflecting indigenous ingredients. Sierra Nevada Pale Ale was first made in 1980 and helped popularize the style. Prior to the explosion in popularity of IPAs, this style was the most well-known and popular of American craft beers.

Annexe 5 : Calculs hypothèse n°1 (Bellenguez.M, 2022)

Soit un volume pré-ébullition de 14 L, une densité pré-ébullition de 8,1°P et une ébullition d'une durée de 45 minutes.

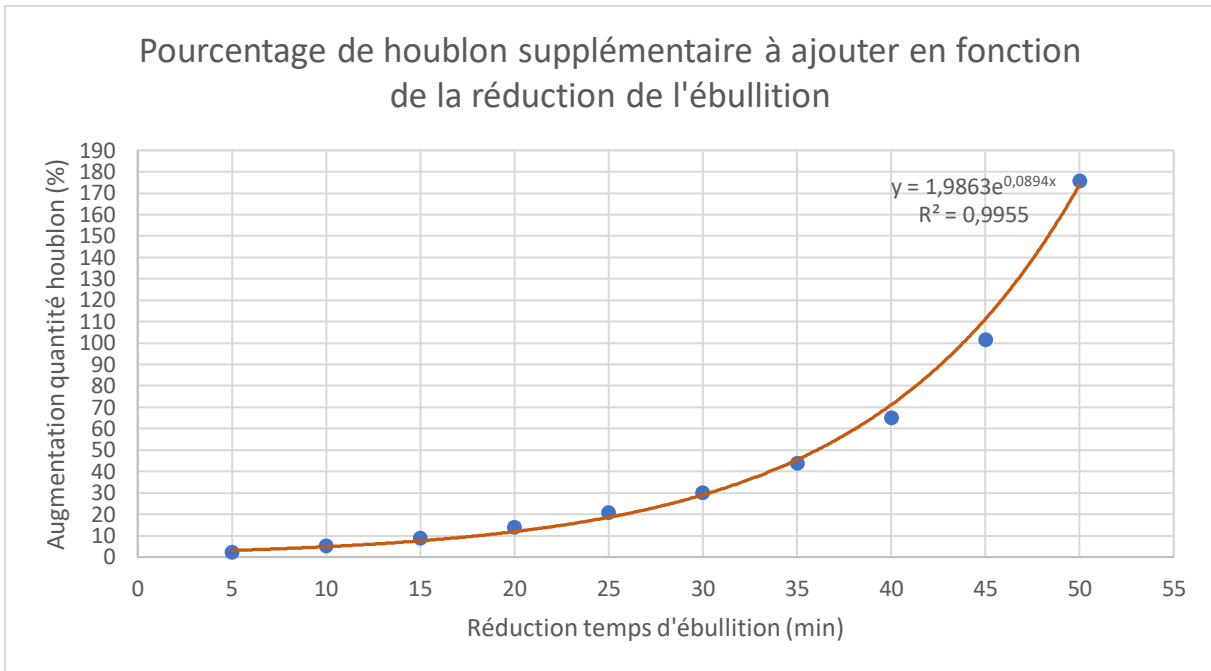
$$1. V_{fin\acute{e}bu} = V_{pr\acute{e}ebu} - Pertes = 14 - 2,25 = 11,75 L$$

$$2. D_{pr\acute{e} - \acute{e}bu} * V_{pr\acute{e} - \acute{e}bu} = DI * V_{fin\acute{e}bu} \Leftrightarrow DI = \frac{D_{pr\acute{e}ebu} * V_{pr\acute{e}ebu}}{V_{fin\acute{e}bu}} = \frac{8,1 \times 14}{11,75} = 9,7^{\circ}P$$

$$3. (DI - D_{pr\acute{e}ebu})_{th\acute{e}orique} = 9,7 - 8,1 = 1,6^{\circ}P$$

$$4. (DI - D_{pr\acute{e}ebu})_{observ\acute{e}e} = 9,8 - 8,1 = 1,7^{\circ}P$$

Annexe 6 : Quantité de houblon supplémentaire à ajouter en fonction de la réduction du temps d'ébullition (Bellenguez.M, 2022)



Annexe 7 : Démonstration pour le calcul de l'amertume en fonction de deux temps d'ébullition (Bellenguez.M, 2022)

Un moût à une densité pré-ébullition de 1,060 est considéré avec une densité post ébullition de 1,069 et un volume post ébullition de 20 litres avec ajout de 10g de houblon à 10% d'acide alpha.

**Calcul de l'utilisation**

L'utilisation décrit l'efficacité de l'isomérisation de l'acide alpha en fonction du temps d'ébullition et de la densité du moût.

$$Utilisation = 1,65 \times 0,000125 \left( \frac{densité}{1000} - 1 \right) \times \frac{1 - e^{(-0,04 \times temps)}}{4,15}$$

Où :

- Densité = densité pré-ébullition
- Temps = temps d'ébullition (min)

$$Utilisation_{60 \text{ min}} = 1,65 \times 0,000125 \left( \frac{1060}{1000} - 1 \right) \times \frac{1 - e^{(-0,04 \times 60)}}{4,15} = 0,21 \text{ soit } 21\%$$

$$Utilisation_{45 \text{ min}} = 1,65 \times 0,000125 \left( \frac{1060}{1000} - 1 \right) \times \frac{1 - e^{(-0,04 \times 45)}}{4,15} = 0,19 \text{ soit } 19\%$$

**Facteur de correction de densité**

Le facteur de correction de densité est calculé uniquement pour les moûts dont la densité est supérieure à 1.050.

$$C_{densité} = 1 + \left( \frac{\frac{densité}{1000} - 1,050}{0,2} \right)$$

$$C_{densité} = 1 + \left( \frac{\left( \frac{1060}{1000} - 1,050 \right)}{0,2} \right)$$

$$C_{densité} = 1,05$$

Où :

- Densité = densité pré-ébullition



**Calcul de l'IBU**

$$IBU = \frac{\text{poids} \times \text{utilisation} \times \alpha \times 10}{\text{volume} \times \text{densité}}$$

$$IBU_{60 \text{ min}} = \frac{10 \times 0,21 \times 10 \times 10}{20 \times 1,069} = 9,8 \text{ IBUs}$$

$$IBU_{45 \text{ min}} = \frac{10 \times 0,19 \times 10 \times 10}{20 \times 1,069} = 8,9 \text{ IBUs}$$

Pour une même recette (même volume de moût, même densité, même type de houblon), quelle quantité en pourcentage doit être apportée en plus si le temps d'ébullition diminue de 15 minutes ? L'égalité suivante peut s'écrire :

$$IBU_{45 \text{ min}} = IBU_{60 \text{ min}}$$

$$\frac{m_{60} \times 10 \times \alpha \times u_{60}}{V \times \text{densité}} = \frac{m_{45} \times 10 \times \alpha \times u_{45}}{V \times \text{densité}}$$

Où :

- m60 = masse de houblon utilisé avec une ébullition de 60 minutes (g)
- m45 = masse de houblon utilisé avec une ébullition de 45 minutes (g)
- α = le pourcentage d'acide alpha du houblon utilisé (%)
- V = volume de moût post-ébullition (L)
- Densité = densité du moût
- U60 = utilisation du houblon avec une ébullition de 60 minutes
- U45 = utilisation du houblon avec une ébullition de 45 minutes

α, V, densité sont équivalents pour les deux temps d'ébullition, l'équation simplifiée est la suivante :

$$m_{60} \times u_{60} = m_{45} \times u_{45} \text{ or, } u = 1,65 \times 0,000125^{\left(\frac{\text{densité}}{1000} - 1\right)} \times \frac{1 - e^{(-0,04 \times \text{temps})}}{4,15}$$

L'équation s'écrit alors :

$$m_{60} \times 1,65 \times 0,000125^{\left(\frac{\text{densité}}{1000} - 1\right)} \times \frac{1 - e^{(-0,04 \times \text{temps}_{60})}}{4,15}$$

$$= m_{45} \times 1,65 \times 0,000125^{\left(\frac{\text{densité}}{1000} - 1\right)} \times \frac{1 - e^{(-0,04 \times \text{temps}_{45})}}{4,15}$$

Où :

- temps60 = durée de l'ébullition 60 minutes
- temps45 = durée de l'ébullition 45 minutes
- densité = densité du moût avant ébullition

Les densités du moût avant ébullition sont les mêmes, l'équation se simplifie:

$$m_{60} \times 1 - (e^{(-0,04 \times \text{temps}_{60})}) = m_{45} \times (1 - e^{(-0,04 \times \text{temps}_{45})})$$

$$\Leftrightarrow m_{45} = \frac{m_{60} \times (1 - e^{(-0,04 \times \text{temps}_{60})})}{1 - e^{(-0,04 \times \text{temps}_{45})}}$$

Plus globalement, cette équation peut se généraliser à tout temps d'ébullition en s'écrivant :

$$m_1 = \frac{m_2 \times (1 - e^{(-0,04 \times t_2)})}{1 - e^{(-0,04 \times t_1)}}$$

Où :

- t1 = temps d'ébullition réduit (min)
- m1 = masse de houblon correspondante au temps d'ébullition t1 (g)

Etude d'une modification du processus de brassage de la bière

- t2 = temps d'ébullition de référence (min)
- m2 = masse de houblon correspondante au temps d'ébullition t2 (g)

*Annexe 8 : Ratio quantité de malt/volume moût produit (Bellenguez.M, 2022)*

#### **Calcul du volume post-ébullition**

$$V_f = V_{\text{préébu}} - \text{Pertes} \times t_{\text{ébu}}$$

Où :

- Vf = volume post-ébullition (L)
- Vpréébu = volume pré-ébullition (L) (un volume arbitraire de 23 litres a été choisi)
- Pertes = évaporation dû à l'ébullition (L/h), la valeur choisie est celle de la cuve Grainfather G30 soit 3L/h
- Tébu = temps d'ébullition (en min)

#### **Conversion °P en densité spécifique**

$$\text{Densité} = 1 + \left( \frac{\text{°P}}{(258,6 - 0,880 \times \text{°P})} \right)$$

Où :

- Densité = la densité spécifique du moût
- °P = la densité du moût (°P)

#### **Calcul de la quantité de malt nécessaire pour chaque temps d'ébullition**

$$\text{Qté malt} = \frac{\text{°P} \times \text{Densité} \times \left( \frac{V_f}{100} \right)}{(1 - H) \times R}$$

Où :

- Qté malt = la quantité de malt à utiliser (g)
- °P = la densité cible en fin d'ébullition (une densité arbitraire de 10°P a été choisie)
- Densité = °P converti en densité spécifique
- Vf = le volume post-ébullition (mL)
- H = le taux d'humidité du malt
- R = le rendement en extrait sec

Le malt choisi est le pilsen, avec un taux d'humidité de 4,5% soit 0,045 et un rendement de 81% soit 0,81.

Ainsi pour chaque temps d'ébullition, un volume post-ébullition a été calculé. Ce volume post-ébullition permet de calculer une quantité de malt. Ensuite le ratio a été calculé en divisant la quantité de malt par le volume de moût produit en sorti de cuve d'ébullition.

Annexe 9 : Détail des consommations d'énergie, d'eau et de temps pour deux méthodes de production en brasserie (Bellenguez.M, Dead Centre Brewing)

	1	2/2bis	3/3bis	4/4bis	5/5bis	6	6bis	7/7bis	8/8bis	9	TOTAL	TOTAL proc
Etapas	1	2/2bis	3/3bis	4/4bis	5/5bis	6	6bis	7/7bis	8/8bis	9	TOTAL	TOTAL proc
Description	Chaufe de l'eau (15°C - 75°C)	Empâtage	Repos + recirculation du moût	Rinçage des drêches et transfert en cuve d'ébullition	Chaufe du moût de 72 à 99°C	Dédréçage et nettoyage de la cuve d'empâtage	Dédréçage et rinçage de la cuve d'empâtage	Ebullition et whirlpool	Refroidissement et transfert en fermenteur	Nettoyage de l'installation complète	TOTAL	TOTAL proc
<b>Brassin simple</b>	Consommation d'eau (l)	0	0	0	0	100		0	500	150	1750	35
	Consommation d'énergie (kWh)	70	0	0	20	0		8	0	0	98	19
	Temps passé (min)		60	15	45	120 (dont 30 min en temps masqué)	Temps masqué	120	120	150	600	12
<b>Brassin double</b>	Consommation d'eau (l)	0	0	0	0	100	100	0	1000	150	2750	27
	Consommation d'énergie (kWh)	98	0	0	0	0	0	16	0	0	154	15
	Temps passé (min)		120 (dont 60 min en temps masqué)	30	90	240 (dont 60 min en temps masqué)	Temps masqué	240	240	150	990	99

## XI. Table des figures

FIGURE 1 : LES 4 ACTIVITES DE BREWING THEORY (SOURCE : BREWING THEORY).....	2
FIGURE 2 : COUPE DE CONE DE HOUBLON FRAIS (SOURCE : BTOBEER).....	4
FIGURE 3 : HOUBLON EN PELLET (SOURCE : HOPENHOUBLON) .....	4
FIGURE 4 : SACCHAROMYCES CEREVISIAE (SOURCE : FUTURA SCIENCES).....	5
FIGURE 5 : DEGRADATION DE L'AMIDON PAR LES AMYLASES (UNIVERS BIERE) .....	5
FIGURE 6 : PRISE DE DENSITE AVEC UN DENSIMETRE (BELLENGUEZ M. 2020).....	7
FIGURE 7 : LES ACIDES ISO ALPHA (BTOBEER, 2017) .....	9
FIGURE 8 : FORMATION DU DMS A PARTIR DE SMM (REDDERS.T) .....	10
FIGURE 9 : EVOLUTION DU PRIX DES PRINCIPALES MATIERES PREMIERES EXPORTEES PAR LA RUSSIE ET L'UKRAINE (OCDE, 2022) ....	12
FIGURE 10 : EVOLUTION DES PRIX DU GAZ FRANÇAIS (PEG) POUR LES TRIMESTRES D'HIVER 2022-2023 ET POUR L'ANNUEL 2023 (COMMISSION DE REGULATION DE L'ENERGIE, 2022) .....	13
FIGURE 11 : DIMENSIONS DE LA CUVE DE BRASSAGE (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	14
FIGURE 12 : REPRESENTATION DES FLUX THERMIQUES DE LA CUVE LORS DE L'EBULLITION (BELLENGUEZ.M, 2022).....	15
FIGURE 13 : DIAGRAMME DE GANTT (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	19
FIGURE 14 : RECAPITULATIF INGREDIENTS ET PARAMETRES DE BRASSAGE BLONDE ALE (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	21
FIGURE 15 : FERMENTEURS EN CHAMBRE THERMOSTATEE A 20°C (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	21
FIGURE 16 : INSTALLATION D'EMBOUTEILLAGE (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	22
FIGURE 17 : MOUTS DE 60 MIN (A GAUCHE) ET 45 MIN (A DROITE) DANS LES CONES D'IMHOFF (BELLENGUEZ.M, 2022).....	22
FIGURE 18 : PHMETRE HANNA LAB (BELLENGUEZ.M, 2022).....	22
FIGURE 19 : DENSIMETRE DMA 35 (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	22
FIGURE 20 : FILTRATION DES DEUX BIERES 1 (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	23
FIGURE 21 : FILTRATION DES DEUX BIERES 2 (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	23
FIGURE 22 : SPECTROPHOTOMETRE UTILISE POUR LES ANALYSES (BELLENGUEZ.M, 2022).....	23
FIGURE 23 : ALCOOL METRE ET ANALYSEUR D'EXTRAIT ALEX 500 (BELLENGUEZ.M, 2022).....	23
FIGURE 24 : APPAREIL CBOXQC (BELLENGUEZ.M, 2022).....	24
FIGURE 25 : VERRES OPAQUES UTILISES POUR LE TEST TRIANGULAIRE (BELLENGUEZ.M, 2022).....	25
FIGURE 26 : COMPARAISON DES BRASSAGES A 45 MIN ET 60 MIN D'EBULLITION (BELLENGUEZ.M, 2022).....	25
FIGURE 27 : COMPARAISON DE LA COULEUR DES MOUTS (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	26
FIGURE 28 : COMPOSITION EN DIFFERENTS SEDIMENTS DES MOUTS (BELLENGUEZ.M, 2022).....	27
FIGURE 29 : COMPARAISON DES CINETIQUES DE FERMENTATION DE LA LEVURE POUR LES DEUX MOUTS (BELLENGUEZ.M, 2022) ....	28
FIGURE 30 : COMPARAISON DE LA COULEUR DES BIERES 45 MIN (GAUCHE) ET 60 MIN (DROITE) (BELLENGUEZ.M, 2022).....	30
FIGURE 31 : COMPARAISON DES BOITES DE PETRI CONTENANT LE MILIEU UBA (BELLENGUEZ.M, 2022).....	30
FIGURE 32 : OBSERVATION MICROSCOPIQUE DES COLONIES SUR GELOSE UBA DE LA BIERE 60 MIN APRES COLORATION DE GRAM (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	31
FIGURE 33 : OBSERVATION MICROSCOPIQUE DES COLONIES SUR GELOSE UBA DE LA BIERE 45 MIN APRES COLORATION DE GRAM (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	31
FIGURE 34 : OBSERVATION MICROSCOPIQUE DE SACCHAROMYCES CEREVISIAE APRES COLORATION DE GRAM (UNIVERSITE PONTIFICALE JAVERIANA) .....	31
FIGURE 35 : COMPARAISON DES BOITES DE PETRI CONTENANT LE MILIEU LYSINE (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	31
FIGURE 36 : COMPARAISON DES BOITES DE PETRI CONTENANT LE MILIEU MRS (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	32
FIGURE 37 : OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES DES COLONIES PRELEVEES SUR GELOSE MRS APRES COLORATION DE GRAM ET COMPARAISON AVEC UNE OBSERVATION MICROSCOPIQUE DE LACTOBACILLES (BELLENGUEZ.M, DRPRABHURAJESHWAR C.) ...	32
FIGURE 38 : RATIO IBU/DI (ROLLING BEERS, 2021).....	33
FIGURE 39 : COMPARAISON DES DEUX BRASSAGES EN CONSIDERANT UN RENDEMENT D'EMPATAGE DE 86% POUR LA BIERE 45 MIN (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	37
FIGURE 40 : EVOLUTION DU RATIO QUANTITE MALT/VOLUME DE MOUT PRODUIT EN FONCTION DU TEMPS D'EBULLITION (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	40
FIGURE 41 : ECONOMIES REALISEES ET DEPENSES SUPPLEMENTAIRES EN HOUBLON EN FONCTION DE LA REDUCTION DU TEMPS D'EBULLITION (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	41
FIGURE 42 : DEROULEMENT CHRONOLOGIQUE D'UN BRASSIN SIMPLE ET D'UN BRASSIN DOUBLE (BELLENGUEZ.M, DEAD CENTRE BREWING).....	43

## XII. Table des tableaux

TABLEAU 1 : ACIDE AMINE, ALDEHYDES DE STRECKER FORMES ET AROMES ASSOCIES DURANT LA REACTION DE MAILLARD (BREWERSJOURNAL, 2017).....	11
TABLEAU 2 : CONSOMMATION D'ENERGIE DES DIFFERENTES ETAPES DU PROCESSUS DE BRASSAGE (SCHELLER ET AL., 2008) .....	14
TABLEAU 3 : QUANTITE ET TEMPS D'AJOUT DES HOUBLONS DE LA RECETTE EXPERIMENTALE (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	20
TABLEAU 4 : ABSORBANCES MEASUREES SUR LES DEUX MOUTS ET EQUIVALENT EN EBC (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	26
TABLEAU 5 : QUANTITES ET NATURE DES SEDIMENTS CONTENUS DANS LES MOUTS (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	27
TABLEAU 6 : RECAPITULATIF ET COMPARATIF DES DENSITES, DU TAUX D'ALCOOL ET DE L'ATTENUATION A L'ISSUE DE LA FERMENTATION (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	28
TABLEAU 7 : DONNEES OBTENUES SUITE A LA MESURE DE CO2 ET O2 DISSOUS DES DEUX BIERES (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	28
TABLEAU 8 : DONNEES OBTENUES SUITE A L'ANALYSE DE L'APPAREIL ALEX 500 DES DEUX ECHANTILLONS DE BIERE (BELLENGUEZ.M, 2022).....	29
TABLEAU 9 : RESULTATS OBTENUS APRES MESURE DE L'ABSORBANCE AU SPECTROPHOTOMETRE DES DEUX BIERES (BELLENGUEZ.M, 2022).....	29
TABLEAU 10 : SIMILITUDES ET DIFFERENCES MORPHOLOGIQUES ENTRE LES COLONIES DE LA BIERE 45 MIN ET 60 MIN SUR GELOSE UBA (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	30
TABLEAU 11 : NOMBRE MINIMUM DE JUGEMENTS CORRECT PAR RAPPORT AU NOMBRE DE JUGEMENTS TOTAL NECESSAIRE POUR DETERMINER UNE DIFFERENCE SENSORIELLE LORS D'UN TEST TRIANGULAIRE (AGROPARISTECH) .....	33
TABLEAU 12 : RECAPITULATIF ET COMPARAISON DES TAV MESURES ET CALCULES (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	36
TABLEAU 13 : DI, DF ET TAV DE LA BIERE 45 MIN AVEC UN RENDEMENT D'EMPATAGE DE 86% (BELLENGUEZ.M, 2022).....	37
TABLEAU 14 : BILAN DES TAV CALCULES ET MESURES ET PRISE EN COMPTE DES IMPRECISIONS DE L'APPAREIL ALEX 500 (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	38
TABLEAU 15 : ECONOMIES D'ENERGIE, DE TEMPS ET D'EAU REALISEES GRACE A UN DOUBLE BRASSIN (BELLENGUEZ.M, 2022) .....	43

### XIII. Liste des sigles et abréviations

<b>BJCP</b>	Beer Judge Certification Program
<b>CIP</b>	Clean In Place
<b>DF</b>	Densité Finale
<b>DI</b>	Densité initiale
<b>DMS</b>	Diméthylsulfure
<b>FWH</b>	First Wort Hopping
<b>IBU</b>	International Bitterness Unit
<b>IDE</b>	Investissement Direct à l'Étranger
<b>IPA</b>	India Pale Ale
<b>MRS</b>	Man, Rogosa, Sharpe
<b>pH</b>	Potentiel hydrogène
<b>PEG</b>	Point d'échange de Gaz
<b>SMM</b>	S-Méthyl-méthionine
<b>TAV</b>	Titre Alcoométrique Volumique
<b>UBA</b>	Universal Beer Agar
<b>UFC</b>	Unité Formant Colonie