

Recherche bibliographique de différentes techniques de récupération d'énergie thermique durant le processus brassicole et analyse de rentabilité de 3 d'entre-elles en microbrasserie

Auteur : Vronen, Marc

Promoteur(s) : 2526; 11243

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10827>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DURANT LE PROCESSUS BRASSICOLE ET ANALYSE DE RENTABILITÉ DE TROIS D'ENTRE-ELLES EN MICROBRASSERIE

Marc VRONEN

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS :

Dr. Nicolas DE COCK

Mr. Luc MINNE

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE DES DIFFÉRENTES
TECHNIQUES DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE
THERMIQUE DURANT LE PROCESSUS BRASSICOLE ET
ANALYSE DE RENTABILITÉ DE TROIS D'ENTRE-ELLES
EN MICROBRASSERIE**

Marc VRONEN

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS :

Dr. Nicolas DE COCK

Mr. Luc MINNE

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mes deux co-promoteurs, Mr. Nicolas De Cock et Mr. Luc Minne pour leur disponibilité, leurs conseils avisés ainsi que l'encadrement qu'ils m'ont donnés tout au long de ce travail malgré les difficultés rencontrées suite à la crise du COVID-19.

J'aimerais également remercier mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de mes deux cycles d'études. Merci d'avoir cru en moi, merci de m'avoir toujours soutenu malgré mon parcours parfois chaotique. Merci de m'avoir donné la chance d'arriver arrivé là où j'en suis, je ne vous remercierais jamais assez.

Une mention spéciale pour ma copine, Fanny, qui a su me donner la motivation dans les moments difficiles et qui m'a soutenu tout au long de ces quatre belles années ! Merci à toi, tout ceci n'aurait pas été possible sans toi.

Un grand merci à tous les amis gembloutois qui ont rendu ces quatre années si agréables. Rien de tout cela n'aurait été pareil sans vous, Poum !

Enfin, j'aimerais remercier Mr. Gérald Senden pour ses conseils avisés tout au long de la rédaction de ce travail. Ton aide m'a été précieuse et les connaissances acquises sur le monde brassicole proviennent en grande partie de ton expertise, merci !

Résumé

La consommation d'énergie thermique au sein de la salle de brassage représente 50% des besoins d'une brasserie. Afin de diminuer la consommation énergétique d'une brasserie, il est dès lors intéressant d'optimiser les installations présentes au sein de la salle de brassage. Outre l'argument économique, cela permet également de diminuer la production de gaz carbonique émise par la brasserie et ainsi contribuer à atteindre les objectifs européens relatifs aux émissions de gaz à effet de serre.

Pour ce faire, une synthèse bibliographique des différents outils de production et de récupération d'énergie thermique existants est réalisée. Celle-ci a permis de mettre en évidence différents outils compatibles techniquement et économiquement avec des microbrasseries d'une capacité de production inférieure à 12 500 HL/an, tels que la chaudière, un économiseur sur les fumées de la chaudière, la condensation des vapeurs d'ébullition ainsi qu'une installation solaire thermique.

Ensuite, une analyse financière de différents outils retenus lors de cette synthèse bibliographique est effectuée afin d'en évaluer la viabilité financière. Celle-ci sera en particulier appliquée au cas de la microbrasserie BeerFac installée au sein de la faculté de Gembloux Agro-Bio-Tech. Cette analyse financière révèle qu'aucune des technologies retenues n'est économiquement viable pour la taille actuelle de la brasserie. Une analyse de sensibilité au volume brassé est également effectuée afin de déterminer le volume minimal à brasser afin de rentabiliser de tels investissements.

Enfin, l'influence de différents facteurs tels que le prix du carburant ou le taux d'évaporation durant l'ébullition sur le temps de retour est estimée via la mise en place de coefficients normalisateurs par rapport à la situation actuelle. Ceux-ci permettront d'estimer la variabilité du temps de retour sur investissement en fonction de ces facteurs.

Mots clés : microbrasserie, énergie thermique, récupération énergétique, outils de récupération d'énergie, production d'énergie thermique.

Abstract

Thermal energy consumption in the brew house represents 50% of the needs of a brewery. In order to reduce the energy consumption of a brewery, it is therefore interesting to optimize the facilities present in the brew house. In addition to the economic argument, this also makes it possible to reduce the production of carbon dioxide emitted by the brewery and thus contribute to the achievement of the European objectives on greenhouse gas emissions.

To this end, a bibliographical synthesis of the various existing thermal energy production and recovery tools is carried out. This made it possible to highlight different tools that are technically and economically compatible with microbreweries with a production capacity of less than 12 500 HL/year such as the boiler, an economizer on boiler fumes, condensation of boiling vapors and solar thermal installations.

Then, a financial analysis of the various tools selected during this bibliographic synthesis is carried out in order to assess their viability. This will be applied in particular to the BeerFac microbrewery located within the faculty of Gembloux Agro-Bio-Tech. This financial analysis shows that none of the selected technologies is economically viable for the current size of the brewery. A sensitivity analysis is also carried out to determine the minimum volume to be stirred in order to make such investments profitable.

Finally, the influence of different factors such as the fuel price or the evaporation rate on the payback time will be estimated by setting up normalizing coefficients in relation to the current situation. These will allow the variability of the payback time to be estimated based on these factors.

Key words : microbrewery, thermal energy, energy recovery, energy recovery tools, thermal energy generation.

Liste des abréviations

ECS : eau chaude sanitaire

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PCS : pouvoir calorifique supérieur

kWh : kilowattheure = 3 600 000 Joules

kJ : kilojoules = 10^3 joules

MJ : Mégajoules = 10^6 joules

kg : kilogramme

hPa : hectopascal

HL : hectolitre

FSC : Forest Stewardship Council

PEFC : programme de reconnaissance des certifications forestières

CIP : cleaning in place

MAP : mètre cube apparent

DMS : dimethylsulfure

VOC : composé organique volatiles

kW : kilowatt

MW : mégawatt

HTVA : hors taxe sur la valeur ajoutée

Table des matières

Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	III
Liste des abréviations	V
1. Introduction.....	1
2. Objectifs.....	3
3. Rappels théoriques.....	4
3.1. Procédé brassicole.....	4
3.2. Analyse financière	10
3.2.1. Déduction fiscale	10
3.2.2. Actualisation	10
3.2.3. Taux d'inflation de l'énergie.....	11
3.2.4. Primes.....	11
3.3. Moyens de production et de récupération de chaleur au sein du procédé brassicole	11
3.3.1. Chaudière	11
3.3.2. Récupération d'énergie durant l'ébullition	20
3.3.3. Récupération d'énergie lors du refroidissement du moût.....	25
3.3.4. Récupération sur les fumées de la chaudière (économiseur de fumées)	29
3.3.5. Production d'eau chaude à l'aide de panneaux solaires thermiques	32
4. Matériel et méthode	38
4.1. Introduction.....	38
4.2. Choix financiers	38
4.3. Outils analysés.....	39
4.3.1. Chaudière	39
4.3.2. Économiseur sur les fumées de la chaudière	40
4.3.3. Condensation des vapeurs d'ébullition	42
4.3.4. Production d'eau chaude à l'aide de panneaux solaires thermiques	44
4.4. Étude de la brasserie BeerFac	45
4.5. Normalisation par rapport à la situation actuelle	45
5. Résultats et discussion	47
5.1. Introduction.....	47
5.2. Étude graphique du cas de la brasserie BeerFac.....	47
5.2.1. Économiseur sur les fumées de la chaudière	47

5.2.2.	Condensation des vapeurs d'ébullition	48
5.2.3.	Production d'eau chaude à partir de panneaux solaires thermiques	49
5.2.4.	Discussion	50
5.3.	Étude de sensibilité au volume brassé	50
5.3.1.	Condensation des vapeurs d'ébullition	50
5.3.2.	Économiseur sur les fumées de la chaudière	51
5.3.3.	Production d'eau chaude à partir de panneaux solaires thermiques	53
5.4.	Normalisation par rapport aux paramètres actuels	54
6.	Conclusion	58
7.	Bibliographie.....	61

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des besoins en énergie thermique au sein d'une brasserie, inspiré par (Willaert & Baron, Applying sustainable technology for saving primary energy in the brewhouse during beer brewing, 2004).	1
Figure 2 : Schéma illustratif du processus de brassage en fermentation haute (Processus de brassage en fermentation haute, s.d.).	4
Figure 3 : Concassage du malt (à gauche) et son acheminement vers la cuve d'empâtage (à droite) (Mosher & Trantham, 2017).	5
Figure 4 : Cuve de filtration avec son système de grille perforée et ses râtaux tournants (Lauter tuns and brewing equipment, s.d.).	6
Figure 5 : Illustration du principe de fonctionnement d'un whirlpool (3D animation The art of brewing, s.d.).	7
Figure 6 : Répartition graphique des différents postes consommateurs d'énergie thermique dans une brasserie.	9
Figure 7 : Graphique comparatif des prix et émissions de CO ₂ en fonction du combustible (Fronhoffs, 2015).	13
Figure 8 : Évolution du prix des combustibles bois, mazout, gaz naturel et propane de janvier 2008 à décembre 2019 (Bombeck, 2020).	14
Figure 9 : Pertes d'une chaudière en fonctionnement (Rendement d'une chaudière, 2017).	16
Figure 10 : Chaleur totale d'un kg de vapeur à pression atmosphérique ((ICEDD) & Econotec, 2010).	17
Figure 11 : Illustration du fonctionnement d'une cuve double enveloppe (Comment la vapeur fournit-elle un chauffage rapide ?, s.d.).	18
Figure 12 : Schéma de principe d'une chaudière à tubes de fumées (Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, 2012).	19
Figure 13 : Illustration et schéma de fonctionnement d'un générateur vapeur (Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, 2012).	19
Figure 14 : Cuve d'ébullition fonctionnant avec un système de chauffe à flamme directe (Cuves ébullition GAZ - 100 à 800 Litres, s.d.).	21
Figure 15 : Schéma de principe d'une cuve d'ébullition utilisant une calandre externe et un cône de déflexion (Mosher & Trantham, 2017).	22
Figure 16 : Cuve d'ébullition équipée d'un condenseur de vapeur (non pressurisé) ainsi que d'une cuve de stockage d'eau chaude (5) et d'un préchauffeur de moût avant ébullition (3) (Vollhals, 1994) ; 1- cuve collectrice ce moût, 2- cuve d'ébullition, 3- échangeur préchauffeur de moût, 4- condenseur de vapeur, 5- cuve de stockage d'eau chaude.	24
Figure 17 : Illustration d'un transfert de chaleur au travers d'un matériau métallique entre deux fluides (Mosher & Trantham, 2017).	26
Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à co-courant (Différents types d'échangeurs de chaleur, 2015).	27
Figure 19 : Évolution de la température en fonction de la position dans le système dans un échangeur à co-courant (à gauche) et à contre-courant (à droite) (Mosher & Trantham, 2017).	27
Figure 20 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à coquilles et à tubes (Mosher & Trantham, 2017).	28
Figure 21 : Illustration du principe de fonctionnement d'un échangeur à coquilles et à tubes hybrides (Mosher & Trantham, 2017).	28
Figure 22 : Illustration du fonctionnement d'un échangeur à plaques (Fonctionnement d'un échangeur à plaques, s.d.).	29
Figure 23 : Schéma de principe d'un économiseur de fumées suivi d'un condenseur sur une chaudière vapeur (Intégration des énergies renouvelables et de récupération dans l'industrie - Fiche technique Fumées de chaudières à vapeur, 2018).	30
Figure 24 : Schéma de principe du fonctionnement d'une installation solaire thermique avec une chaudière d'appoint (Capteur solaire à eau chaude, 2010).	32
Figure 25 : Vue en coupe d'un capteur plan vitré (Capteur solaire à eau chaude, 2010).	33
Figure 26 : Vue en coupe d'un capteur solaire à tubes sous vide avec absorbeur sur ailette en cuivre (Capteur solaire à eau chaude, 2010).	34
Figure 27 : Illustration du rendement d'un panneau solaire thermique (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010).	34

Figure 28 : Evolution du rendement en fonction de la température de différents types de capteurs solaires thermiques (Capteur solaire à eau chaude, 2010).	35
Figure 29 : Variation du taux d'utilisation de l'installation solaire thermique en fonction de la fraction solaire (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010).	35
Figure 30 : Relation entre la superficie de panneaux installée, la fraction solaire et le rendement d'une installation solaire thermique (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010).	36
Figure 31 : Evolution annuelle de l'angle d'inclinaison optimal de panneaux solaires à Philippeville (Importance de l'orientation et des types de structures, s.d.).	36
Figure 32 : Évolution du cashflow cumulé actualisé lors de l'investissement dans un économiseur de fumées sur la chaudière de la brasserie BeerFac.	48
Figure 33 : Évolution du cashflow cumulé actualisé lors de l'investissement dans un condenseur sur les vapeurs d'ébullition de la brasserie BeerFac.	49
Figure 34 : Evolution du cashflow cumulé actualisé lors de l'investissement dans une installation solaire thermique de la brasserie BeerFac.	50
Figure 35 : Evolution du temps de retour simple sur investissement d'un échangeur sur les vapeurs de la cuve d'ébullition en fonction du type de carburant et du volume brassé.	51
Figure 36 : Évolution du temps de retour simple sur investissement d'un économiseur de fumées en fonction du volume brassé et du cours le plus haut/bas/actuel du mazout sur les 10 dernières années.	52
Figure 37 : Évolution du temps de retour simple sur investissement d'un économiseur de fumées en fonction du volume brassé et du cours le plus haut/bas/actuel du propane sur les 10 dernières années.	52
Figure 38 : Évolution du temps de retour sur investissement d'un économiseur de fumées en fonction du volume brassé et du cours le plus haut/bas/actuel du gaz naturel sur les 10 dernières années.	53
Figure 39 : Evolution du temps de retour simple sur investissement d'une installation de panneaux solaires thermiques en fonction du type de carburant utilisé et du volume brassé.	54
Figure 40 : Coefficients normalisateurs par rapport au coût actuel du propane lors de l'investissement dans un économiseur de fumée.	55

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Températures initiales, finales et delta de température lors des différentes étapes du procédé brassicole, inspiré par : (Zogla, Zogla, Beloborodko, & Rosa, 2015).	8
Tableau 2 : Répartition des consommations en énergie thermique des différents postes du processus de brassage, inspiré par : (Zogla, Zogla, Beloborodko, & Rosa, 2015).	9
Tableau 3 : Estimation du prix des chaudières bois/mazout/gaz pour des puissances de 20 à 40 kW en Wallonie (janvier 2006) (ValBiom, Les coûts et les performances des installations de chauffage au bois, 2006).	13
Tableau 4 : Quantité de combustible nécessaire pour produire 1000 kWh (Wallonie, 2015).	14
Tableau 5 : Evolution des caractéristiques d'un kg de vapeur sous l'effet d'une augmentation de pression ((ICEDD) & Econotec, 2010).	17
Tableau 6 : Comparaison des principales technologies utilisées pour l'ébullition inspiré de (Willart & Baron, 2005).	25
Tableau 7 : Conductivité thermique de différents matériaux à 20°C inspiré par (Mosher & Trantham, 2017).	26
Tableau 8 : Quantité de fumée dégagée lors de la combustion d'un volume de carburant.	31
Tableau 9 : Facteurs correctifs à appliquer au rendement d'une installation solaire thermique en fonction de son orientation et de son inclinaison par rapport à l'horizontale (Importance de l'orientation et des types de structures, s.d.).	37
Tableau 10 : Variation du coût d'un économiseur posé en fonction de la puissance de la chaudière (EDF).	41
Tableau 11 : Récapitulatif du pouvoir calorifique des différents types de carburants étudiés (Tableau de bord, consommation de combustibles, 2007).	42
Tableau 12 : Cours les plus hauts/bas et actuels des 3 types de combustibles étudiés au cours des 10 dernières années (Bombeck, 2020).	42
Tableau 13 : Variation du coût d'un échangeur sur les vapeurs d'ébullition en fonction de sa puissance ⁶ .	43

<i>Tableau 14 : Tableau récapitulatif des coefficients normalisateurs minimaux/maximaux par rapport au prix actuel du carburant lors de l'investissement dans un économiseur de fumées.</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 15 : Tableau récapitulatif des coefficients normalisateurs minimaux/maximaux par rapport au prix actuel du carburant et de différents taux d'évaporation lors de l'investissement dans un condenseur de vapeur.</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 16 : Evolution du coefficient normalisateur en fonction du prix actuel/minimal/maximal du carburant et du taux d'évaporation.</i>	<i>56</i>

1. Introduction

Historiquement, la Belgique comptait plus de 3000 brasseries dans les années 1900. Ce nombre a fortement diminué jusqu'à atteindre 123 brasseries dans les années 80 (Revue historique de l'économie de la bière, 2017). Ce chiffre est même descendu jusqu'à 24 brasseries en Wallonie en 1986. À l'heure actuelle, de plus en plus de microbrasseries ouvrent leurs portes en Belgique. Il n'existe pas de définition reconnue du terme « microbrasserie ». Cependant, il est admis qu'une brasserie peut être qualifiée de microbrasserie lorsque son volume annuel brassé est inférieur à 12 500 HL. Lors de l'année 2017, en moyenne 3 microbrasseries étaient créées tous les mois (Micro-brasseries : une bulle prête à exploser ?, 2019). Actuellement, ce ne sont pas moins de 231 brasseries qui sont recensées dans tout le pays (Brasseries belges, s.d.). Chacune de ces brasseries produit annuellement une quantité de bière variant de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers d'hectolitres.

Les enjeux climatiques actuels obligent notre société à diminuer drastiquement sa consommation énergétique afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les objectifs fixés par le Conseil européen prévoient de réduire ces émissions d'au moins 40% (en comparaison avec le taux d'émission de 1990), d'augmenter la part d'énergies renouvelables au minimum à 32% ainsi que d'améliorer l'efficacité énergétique d'au moins 32,5% (Cadre d'action en matière de climat et d'énergie d'ici à 2030, s.d.).

La consommation en énergie thermique de la salle de brassage représente une part importante des besoins en énergie thermique totaux d'une brasserie comme l'illustre la Figure 1. La salle de brassage représente la moitié de ces besoins. Dès lors, une optimisation énergétique de celle-ci est essentielle afin de diminuer les consommations énergétiques des brasseries.

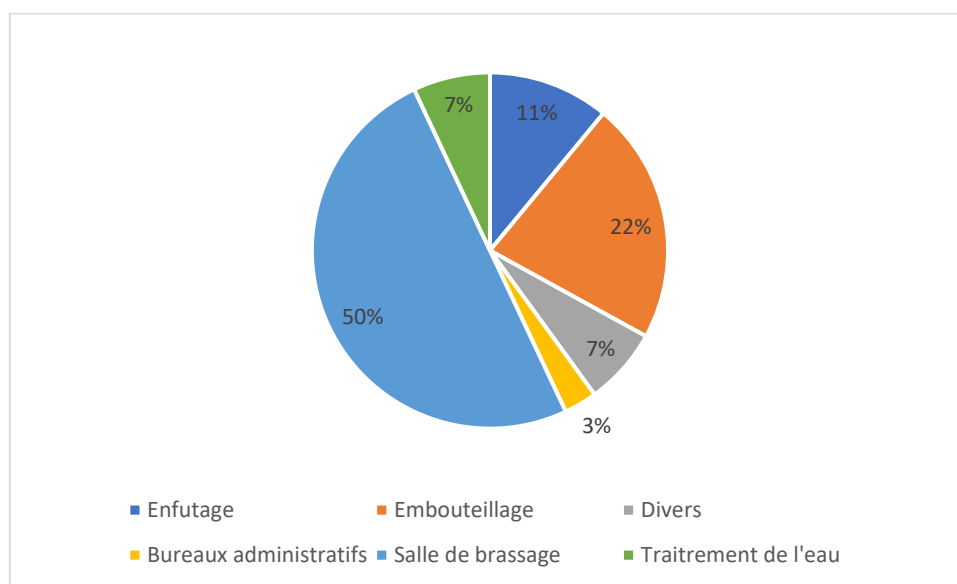


Figure 1 : Répartition des besoins en énergie thermique au sein d'une brasserie, inspiré par (Willaert & Baron, Applying sustainable technology for saving primary energy in the brewhouse during beer brewing, 2004).

La mise en place de techniques de récupération et d'économie d'énergie permet de réduire l'importance des dépenses énergétiques générées par le procédé de brassage. Les grandes brasseries existantes au niveau mondial ont mis sur pied différentes méthodes permettant d'abaisser la consommation énergétique de leur salle de brassage. Néanmoins, les méthodes développées par ces géants de la bière ne sont pas toujours transposables aussi bien techniquement qu'économiquement aux microbrasseries. Dès lors, l'objectif de ce travail est d'étudier les différentes technologies de

récupération d'énergie existantes et d'évaluer celles qui sont adaptées aux microbrasseries. Ensuite, la viabilité financière de certaines d'entre elles est analysée. Cette viabilité financière sera évaluée en particulier pour le cas de la microbrasserie BeerFac implémentée au sein de la faculté de Gembloux Agro-Bio-Tech.

2. Objectifs

Afin de diminuer la consommation énergétique de la brasserie et donc de réduire ses émissions de gaz carbonique et d'ainsi satisfaire aux objectifs européens, une revue de la littérature est réalisée pour mettre en évidence les techniques de récupération d'énergie thermique existantes sur une salle de brassage. Ce travail bibliographique analyse également différentes techniques permettant de diminuer la consommation énergétique de la brasserie. Au terme de cette partie, différentes techniques sont retenues pour leur facilité d'implémentation et leur compatibilité avec les microbrasseries.

La deuxième partie de ce travail présentée à la section 4.3 consiste en une analyse financière de 2 outils de récupération d'énergie thermique ainsi que d'un moyen de production d'eau chaude retenus lors de la première partie de ce travail. Pour ce faire, une analyse graphique du temps de retour sur investissement des 3 outils sera appliquée à la brasserie BeerFac. Ensuite, une analyse de sensibilité est effectuée afin de déterminer l'impact du volume annuel brassé sur le temps de retour des différents investissements. Enfin, différents coefficients normalisateurs ont été déterminés afin de quantifier l'impact sur le temps de retour de différents facteurs comme la variation du coût du carburant ou encore le taux d'évaporation lors de l'ébullition.

3. Rappels théoriques

3.1. Procédé brassicole

Afin de faciliter la compréhension des différents outils de récupération d'énergie qui seront étudiés ultérieurement, il est important d'avoir une vue générale du procédé de brassage.

L'ensemble de cette section est basé sur les ouvrages de référence suivants : (Mosher & Trantham, 2017), (Faiveley, 2020).

Les étapes nécessaires au brassage d'une bière sont schématisées sur la Figure 2. Ce schéma est tiré d'une production industrielle ; de légères variations peuvent apparaître selon les brasseries, le type de bière et le degré d'industrialisation. Dans le cadre de ce travail, seuls les principaux postes consommateurs d'énergie thermique seront étudiés et plus particulièrement les étapes allant de l'empâtage au refroidissement du moût après ébullition, car elles sont présentes dans toutes les brasseries (cadre rouge, Figure 2).

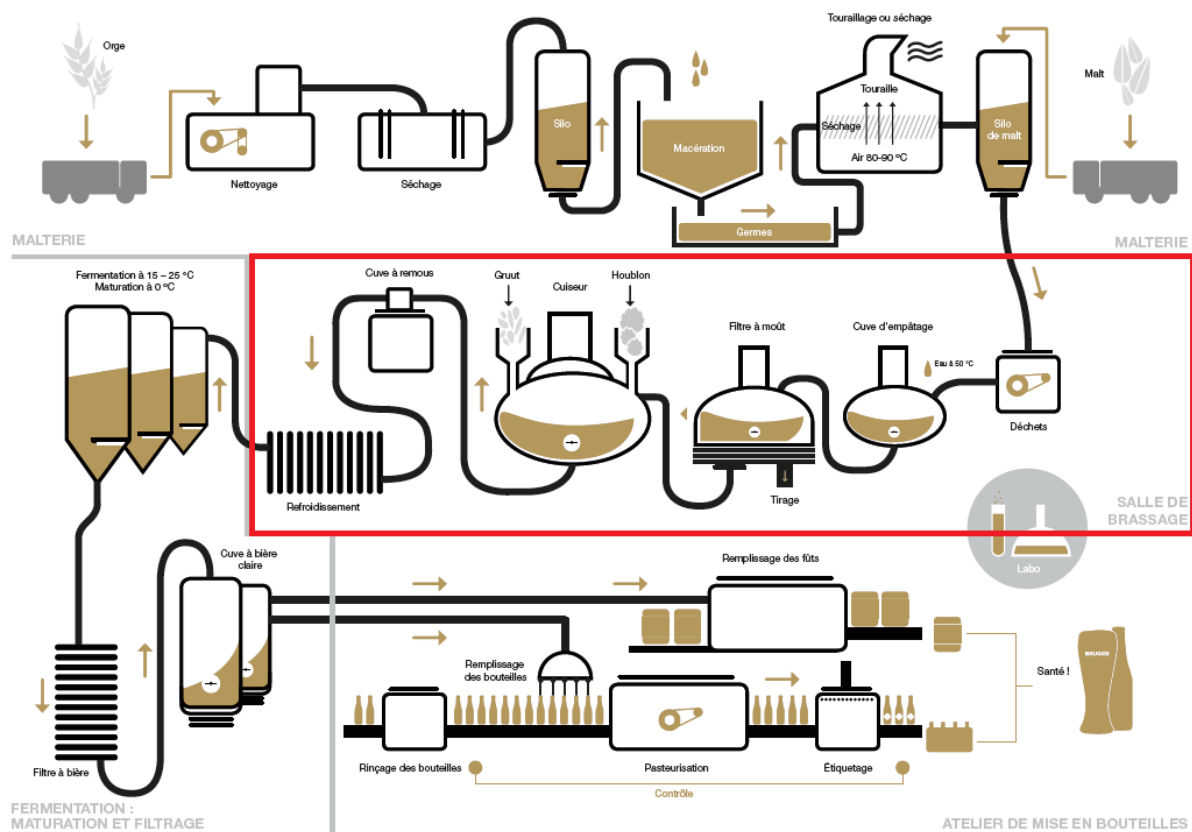


Figure 2 : Schéma illustratif du processus de brassage en fermentation haute (Processus de brassage en fermentation haute, s.d.).

Les étapes préalables afin de produire de l'orge brassicole et de le transformer en malt ne seront pas décrites dans ce travail, car elles ne se déroulent généralement pas au sein de la brasserie en elle-même.

La première phase est le concassage du malt. Durant cette opération, le malt passe dans un moulin constitué de deux cylindres dont l'écartement est modifiable. Cet écartement va impacter la finesse avec laquelle le malt sera concassé, ce qui influencera la filtration qui sera détaillée ultérieurement.

Lors de la deuxième étape, appelée empâtage, le malt est mélangé avec de l'eau chaude via un convoyeur transportant le malt vers la cuve comme le montre la Figure 3. Cette opération a pour but de favoriser la libération de maltose (sucre fermentescible qui sera converti en alcool durant la fermentation) ou de dextrans (sucres non fermentescibles qui donnent une saveur sucrée à la bière). Une montée en température suivant différents paliers est effectuée. En fonction de la température de ceux-ci et de leur durée, la teneur en sucre de la maïsche (mélange d'eau et de malt) et son contenu en protéines seront modifiés. Afin d'homogénéiser la température, un système d'agitation est présent dans la cuve d'empâtage. L'agitation doit cependant être effectuée de manière précautionneuse, car elle augmente la viscosité de la maïsche, ce qui impactera la filtration. Il existe plusieurs moyens de chauffer la cuve comme la chauffe à flamme directe sous la cuve ou chauffe à la vapeur (cuve à double paroi). Ces techniques seront détaillées plus précisément dans la section 3.3.2.2.

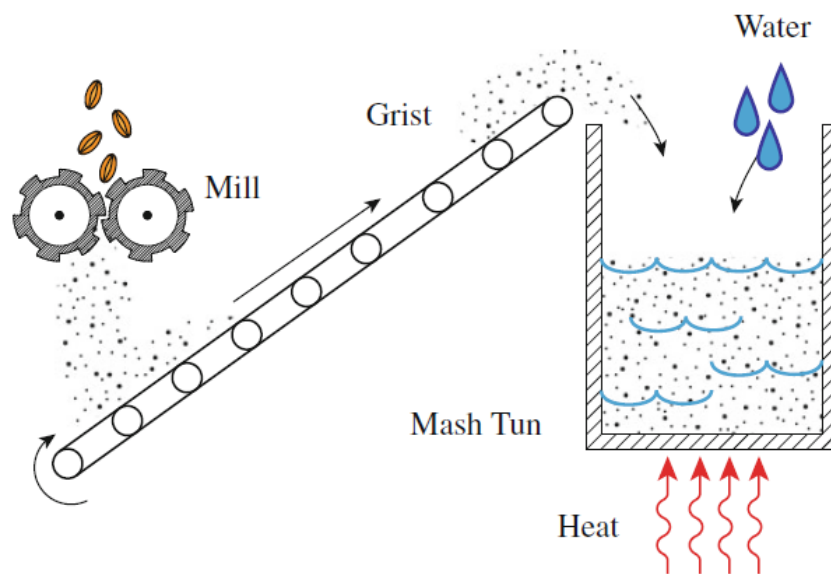


Figure 3 : Concassage du malt (à gauche) et son acheminement vers la cuve d'empâtage (à droite) (Mosher & Trantham, 2017).

La troisième étape, appelée filtration, a pour but de séparer le moût (eau sucrée) des drêches (ce qu'il reste du malt concassé). Celle-ci peut être réalisée de différentes manières. La première est de pomper la maïsche dans une cuve de filtration (la cuve d'empâtage peut également faire office de cuve filtre). Le fond de la cuve est constitué d'un double fond avec un système de grilles en inox perforées au laser. Ce système va permettre de retenir les grains de malt qui vont alors former un « gâteau » qui servira également de filtre. La cuve filtre est plus large et moins profonde que la cuve d'empâtage, ceci ayant un impact sur l'épaisseur du « gâteau » et donc sur sa capacité de filtration. La cuve contient souvent un système de râteaux ou de couteaux tournants comme l'illustre la Figure 4. Cela produit une agitation du gâteau, permettant de le drainer et de le rincer. De l'eau chaude est ajoutée en complément afin de rincer le gâteau et d'extraire tout le sucre qu'il contient.



Figure 4 : Cuve de filtration avec son système de grille perforée et ses râteaux tournants (Lauter tuns and brewing equipment, s.d.).

La seconde consiste en l'utilisation de filtres presse lorsque le malt a été concassé finement à l'empâtage. Ceux-ci sont composés d'une série de poches où est insérée la drêche. Celui-ci est alors pressé afin d'en extraire le moût. De l'eau est ensuite ajoutée afin d'effectuer un deuxième pressage pour récupérer un maximum de sucre. Ce procédé requiert un équipement coûteux, mais est très efficace dans l'extraction du moût sucré.

Lors de la quatrième étape, le moût est transféré dans une nouvelle cuve dans laquelle il sera porté à ébullition pendant une période variant de 30 à 90 minutes. Cette opération est particulièrement énergivore, car une quantité importante d'énergie est perdue lors de l'évaporation de l'eau contenue dans le moût. Durant l'ébullition, le houblon sera ajouté au moût. Cette étape est essentielle pour différentes raisons. Tout d'abord, la température va permettre de solubiliser certains acides contenus dans le houblon, ce qui aura pour conséquence d'ajouter de l'amertume à la future bière. L'ébullition va également augmenter la concentration relative en sucre comme une partie de l'eau contenue dans le moût va s'évaporer, ce qui pourra éventuellement augmenter la teneur en alcool de la bière. Ensuite, cela aura un effet sur la stabilité de la mousse en rendant les protéines globulaires tensioactives. Cela va enfin permettre de détruire totalement les enzymes. Ce traitement thermique n'est cependant pas suffisant pour stériliser complètement la bière. Comme pour l'empâtage, l'apport de chaleur s'effectue soit à la flamme directe, soit via de la vapeur et une cuve à double paroi. Plus rarement, la chauffe peut également s'effectuer au feu de bois.

Dans certains cas, l'ébullition peut être suivie d'une étape, appelée whirlpool, qui a pour but de clarifier le moût. Une illustration du fonctionnement de celui-ci est visible sur la Figure 5. Il s'agit de pomper le moût et de le réinjecter selon un certain angle dans la cuve. Un tourbillon va alors se créer, concentrant les résidus solides au centre de la cuve sous forme d'un cône de sédimentation. Cette opération peut durer une soixantaine de minutes. Le moût sera alors refroidi pour entamer sa phase de fermentation.



Figure 5 : Illustration du principe de fonctionnement d'un whirlpool (3D animation The art of brewing, s.d.).

Lors de la cinquième étape, le moût passe à travers un échangeur qui le refroidit jusqu'à la bonne température pour commencer la fermentation. Celle-ci varie en fonction du type de levures utilisées lors du brassage de la bière. L'étude détaillée du fonctionnement d'un échangeur thermique ainsi que l'énergie récupérée via son utilisation peut être consultée dans la section 3.3.3 consacrée à la récupération d'énergie lors du refroidissement du moût.

Une fois le brassage terminé, le moût est transféré dans des cuves pour la phase de fermentation, cette étape étant réalisée via l'ajout de levures. Celles-ci vont digérer les sucres fermentescibles et les transformer en alcool. Plus de détails concernant les modifications chimiques apportées durant cette phase peuvent être trouvés dans l'ouvrage de Michael Mosher et Kenneth Trantham, « Brewing science : a multidisciplinary approach », dans le chapitre consacré à la fermentation. Cette digestion est exothermique et augmente donc la température du moût au sein de la cuve. La modification de celle-ci influence l'activité des levures. Il est donc important de maîtriser la température à l'intérieur du fermenteur à l'aide d'un apport de froid. La fermentation est déclenchée à température basse, puis celle-ci va progressivement augmenter en suivant un profil défini. Durant la fermentation, les levures dormantes vont sédimenter au fond de la cuve. Cette couche de sédiments sera enlevée par la suite. La fermentation s'effectue à une température variant de 8°C à 23°C en fonction du type de levures. La durée de celle-ci varie de 2 à 14 jours pour les bières de type « Ale » et peut prendre plusieurs mois pour les « Lagers ».

Une fois la fermentation terminée, la bière est mise en garde. Cette étape va réduire le diacétyle en acétoïne grâce aux levures, mais elle va également permettre la saturation du moût en gaz carbonique. Le reste des levures dormantes va continuer à précipiter en fond de cuve. Cela aura pour effet de clarifier la bière. Certains ajustements peuvent être effectués par le brasseur afin d'atteindre les saveurs escomptées. La température de garde varie entre 0 et 6°C, un apport de froid est donc une nouvelle fois nécessaire. Les températures basses permettent de ralentir le métabolisme des levures et la décantation naturelle de celles-ci. La plupart du temps, la garde et la fermentation se déroulent dans des cuves de type cylindro-coniques permettant la sédimentation au fond du cône en un culot.

Afin de clarifier la bière et de stabiliser le produit, la bière peut être centrifugée et pasteurisée. Ces pratiques sont plutôt utilisées dans des procédés industriels, car une grande homogénéité du produit est recherchée. À l'inverse, les microbrasseries n'utilisent pas ces pratiques, car la limpidité ne fait pas partie des critères recherchés. Après cela, la bière est soutirée en bouteilles ou enfûtée.

Lors d'une refermentation en bouteille, la garde est généralement raccourcie. La refermentation permettra de saturer naturellement la bière en CO₂. Durant celle-ci, une régulation de la température aux alentours de 20°C doit être effectuée. Une chambre chaude est donc nécessaire afin d'accueillir les bières en refermentation.

L'énergie thermique nécessaire à chaque étape du processus de brassage est proportionnelle à l'écart de température (ΔT) qui peut être observé lors de ces différentes étapes comme l'illustre le Tableau 1. La température finale de l'empâtage varie en fonction du type de bière brassée et des différents paliers de températures effectués, il s'agit donc ici d'une estimation. La fermentation est exothermique et la quantité de chaleur dégagée lors de celle-ci varie également selon la bière voulue. Cependant, les besoins en froid lors de cette étape sont répartis tout au long de la fermentation et sont négligeables en comparaison avec le reste du procédé brassicole. C'est pourquoi ceux-ci n'ont pas été pris en compte dans le calcul des besoins en énergie thermique.

Tableau 1 : Températures initiales, finales et delta de température lors des différentes étapes du procédé brassicole, inspiré par : (Zogla, Zogla, Beloborodko, & Rosa, 2015).

Étapes du procédé de brassage	Empâtage	Filtration	Ebullition	Refroidissement	Fermentation	Garde
Température initiale (T ₁), [°C]	10	75	75	90	8	20
Température finale (T ₂), [°C]	75	75	100	8		3
Différence de température (ΔT)	65	0	25	-82		-17

Sur base des ΔT disponibles dans le Tableau 1 et de l'Équation 1, les besoins spécifiques théoriques (q_1) de consommation d'énergie peuvent être calculés pour chaque étape du processus. Ce calcul ne tient pas compte des déperditions thermiques qui ont cours via les parois des différentes cuves ni du rendement du système de chauffe/refroidissement. Néanmoins, cela donne une idée plus précise de l'impact en énergie thermique de chacune des phases du process.

$$q_1 = \left| \frac{c}{p} * m * T_1 - T_2 \right| \text{ [kWh]}$$

Équation 1 : Équation permettant d'évaluer la demande en énergie thermique/frigorifique de chaque étape du procédé brassicole (Zogla, Zogla, Beloborodko, & Rosa, 2015).

Où

- **c** est la chaleur spécifique de l'eau, à savoir 4187 [J/(kg*K)]
- **m** est la masse d'eau [kg]
- **T₁** est la température initiale [°C]
- **T₂** est la température finale [°C]
- **p** est un coefficient de conversion pour passer de J en kWh, 3 600 000 [J/kWh]

Durant l'ébullition, des pertes énergétiques importantes ont lieu en raison de l'évaporation. L'énergie perdue via ces vapeurs (et qui doit donc être fournie au système pour maintenir l'ébullition) est approximée via l'Équation 2. Le taux d'évaporation pouvant varier de 8 à 12%, une valeur de 10% a été retenue.

$$q_2 = \frac{m_{evap} * L}{p} \text{ [kWh]}$$

Équation 2 : Pertes calorifiques résultant de l'évaporation (Zogla, Zogla, Beloborodko, & Rosa, 2015).

Où

- q_2 est la quantité d'énergie perdue via évaporation des vapeurs d'ébullition [kWh]
- m_{evap} correspond à la quantité d'eau évaporée [kg]
- L est la chaleur spécifique d'évaporation de l'eau, 2258 [kJ/kg]
- p est un coefficient de conversion pour passer de J en kWh, 3 600 000 [J/kWh]

Un récapitulatif des consommations inhérentes à chaque phase du processus de brassage peut être consulté dans le Tableau 2. La consommation énergétique de chaque étape correspond aux besoins spécifiques théoriques (q_1) sauf pour l'ébullition où les pertes par évaporation y ont été ajoutées (q_2). Le refroidissement apparaît être le poste le plus énergivore, suivi par l'ébullition et l'empâtage. Il est cependant important de souligner que ces résultats supposent un procédé brassicole sans aucune récupération d'énergie. De ce fait, l'eau utilisée pour l'empâtage est supposée être à une température 10°C et l'énergie utilisée pour le refroidissement perdue. Ces résultats sont donc purement théoriques. Ce tableau ne reprend pas les dépenses énergétiques liées au système de cleaning in place (CIP) qui nécessite de l'eau chaude afin de nettoyer l'équipement brassicole. Cependant, toutes les brasseries ne sont pas équipées d'un tel système et les besoins en eau chaude pour des opérations de nettoyage sont extrêmement variables en fonction de la taille et du degré d'industrialisation des brasseries. C'est pourquoi ceux-ci n'ont pas été pris en compte dans l'analyse des consommations énergétiques de ce travail.

Tableau 2 : Répartition des consommations en énergie thermique des différents postes du processus de brassage, inspiré par : (Zogla, Zogla, Beloborodko, & Rosa, 2015).

Étape du procédé de brassage	Empâtage	Filtration	Ebullition	Refroidissement	Fermentation	Garde
Consommation énergétique [kWh]	7,56	0,00	9,18	9,54	-	1,98

La répartition des besoins en énergie de la brasserie est visible sur la Figure 6.

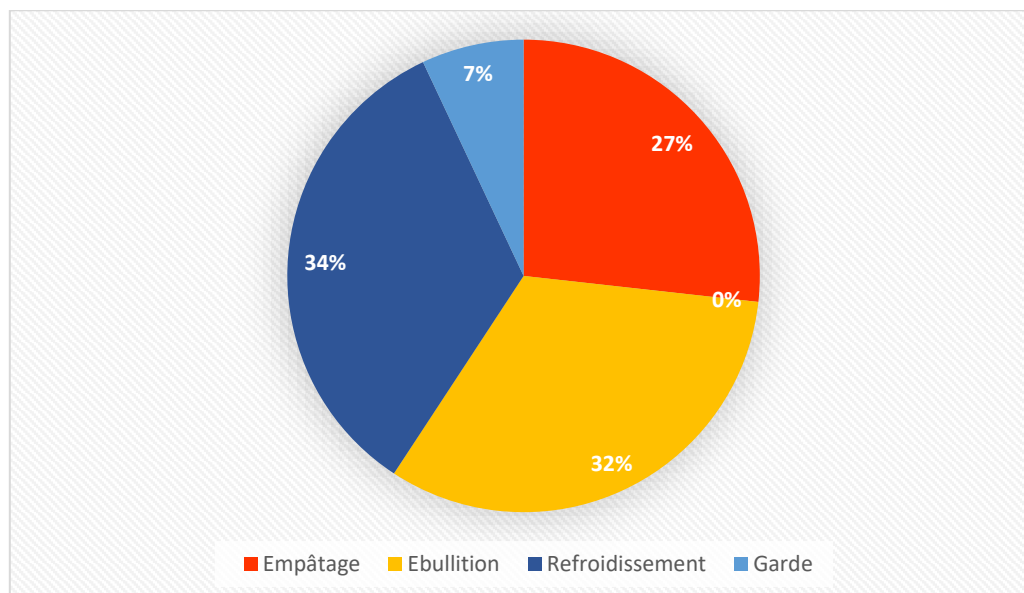


Figure 6 : Répartition graphique des différents postes consommateurs d'énergie thermique dans une brasserie.

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique brassicole, il apparaît dès lors important de limiter la dépense énergétique utilisée lors des étapes d'empâtage et d'ébullition, qui sont les principaux postes consommateurs d'énergie thermique. À l'opposé, il est important de limiter la perte liée au

refroidissement du moût qui est un gros consommateur de froid au sein du procédé brassicole. La suite de ce travail étudiera différentes techniques liées à la production d'eau chaude ainsi qu'à la récupération d'énergie notamment afin de réduire la facture énergétique d'une telle entreprise.

3.2. Analyse financière

Différents mécanismes vont influencer le temps de retour et donc la rentabilité d'un investissement. Ceux-ci seront passés en revue à titre indicatif. Ces paramètres sont variables d'une entreprise à l'autre. La section suivante détaille les différentes variables financières utilisées dans le cadre de cette étude.

3.2.1. Déduction fiscale

Lors de l'installation de systèmes de récupération d'énergie dans une entreprise, des avantages fiscaux peuvent être obtenus. L'investissement doit concerner des immobilisations amortissables corporelles ou non, acquises à l'état neuf durant l'année ou l'exercice comptable et affectées en Belgique à l'exercice de l'activité professionnelle (Déduction pour investissement, s.d.).

Pour les sociétés, une déduction fiscale peut être obtenue lors d'investissements économiseurs d'énergie. Plus d'informations quant à l'éligibilité d'une entreprise à cette déduction fiscale peuvent être trouvées sur le site du service public fédéral des finances¹.

3.2.2. Actualisation

L'actualisation est utilisée pour déterminer la valeur actuelle d'une somme future. Le principe est d'assigner une valeur moindre à des sommes futures (Michel, 2020). Il s'agit de l'opération inverse de l'addition d'intérêts. En effet, si une entreprise décide d'investir aujourd'hui dans un outil de récupération énergétique, le capital utilisé aurait pu être investi dans un autre placement produisant un intérêt. D'après le site de la FAO, il s'agit donc de « convertir les coûts et les bénéfices d'un investissement en leurs équivalents au moment présent, c'est-à-dire en leur donnant une valeur actualisée » (Annexe 2 - Valeur actualisée 1/, 1984).

La valeur actualisée est calculée via l'Équation 3 :

$$V_{act} = Coût * \frac{1}{(1+r)^n}$$

Équation 3 : Équation utilisée pour actualiser un coût ou un bénéfice (Annexe 2 - Valeur actualisée 1/, 1984).

Où

- **V_{act}** est la valeur actualisée
- **$Coût$** est le coût ou le bénéfice à actualiser
- $\frac{1}{(1+r)^n}$ est le coefficient d'actualisation
- **r** est le taux d'actualisation
- **n** est l'année considérée

Plus le taux d'actualisation est élevé, plus l'importance des sommes ou avantages futurs sera réduit. De fait, plus le taux est élevé, moins grande sera la valeur actuelle. Cette réduction sera d'autant plus importante au fur et à mesure des années suivant l'investissement. Un taux faible sera destiné à

¹https://finances.belgium.be/fr/entreprises/impot_des_societes/avantages_fiscaux/deduction_pour_investissement#q11

des projets ayant une rentabilité sur le long terme. À l'inverse, un taux élevé fera apparaître les projets à revenus rapides comme étant les plus intéressants. La détermination du taux d'actualisation pour les investissements dans le secteur privé est souvent équivalente au taux directeur réel des banques pour les entreprises, éventuellement augmenté d'une prise de risque (Michel, 2020).

3.2.3. Taux d'inflation de l'énergie

L'inflation correspond à une hausse générale des prix avec comme résultat une dévaluation de la valeur monétaire (Qu'est-ce que l'inflation, s.d.). En 2019, le taux d'inflation de l'énergie annuel en Europe était d'environ 5% (Communiqué de presse euro indicateurs, 2019). Pour le mois de juin 2020, le taux d'inflation énergétique en Belgique était de -14.3% (HICP-Annual percentage changers, breakdown by purpose of consumption : June 2020, 2020). Le taux d'inflation global d'année en année peut être consulté sur via le site de la Banque Centrale Européenne². Dans le cadre de cette étude, un taux d'inflation de l'énergie de 1% a été considéré.

Le taux d'inflation de l'énergie est utilisé pour déterminer le gain annuel futur apporté par les différentes technologies étudiées dans le cadre de ce travail via l'Équation 4.

$$Gain_{annuel} = Gain_{théorique} * (1 + T)^n$$

Équation 4 : Equation permettant de calculer le gain énergétique annuel en tenant compte de l'inflation de l'énergie (Annexe 2 - Valeur actualisée 1/, 1984).

Où

- **$Gain_{annuel}$** est le gain énergétique annuel tenant compte de l'inflation de l'énergie.
- **$Gain_{théorique}$** est le gain énergétique estimé en tenant compte du coût actuel de l'énergie.
- **T** est le taux d'inflation de l'énergie.
- **n** est l'année considérée.

3.2.4. Primes

Des primes peuvent être obtenues lors de l'installation de certains outils de production d'énergie renouvelable/lors de l'installation de systèmes de récupération d'énergie. Celles-ci seront détaillées dans la partie matériel et méthode consacrée à chaque outil analysé.

3.3. Moyens de production et de récupération de chaleur au sein du procédé brassicole

3.3.1. Chaudière

La chaudière est l'élément central de la brasserie, elle va servir à produire l'énergie thermique nécessaire à tout le process de brassage. Cette énergie thermique pourra être produite de différentes manières comme la chauffe à flamme directe ou la chauffe indirecte via l'utilisation de vapeur.

Pour rappel, le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur qui est dégagée par la combustion complète d'une unité de volume de combustible à une température T [K]. Les éléments nécessaires à la combustion ainsi que les produits de la réaction étant considérés dans les mêmes conditions de température et de pression. Il est exprimé le plus souvent en [kJ/kg] de combustible. Il existe deux conceptions du pouvoir calorifique : supérieur (PCS) et inférieur (PCI).

3.3.1.1. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique supérieur d'un gaz rapporté au volume de gaz sec équivaut à la « quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'un volume donné V du gaz dans l'air sous une pression

² https://sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=122.ICP.M.U2.N.000000.3.ANR

de 1013.25 hPa et à la température constante T ; le volume V de gaz étant mesuré dans des conditions spécifiées (T_v , P_v) et toute l'eau formée pendant la combustion étant condensée à la température T », (Laguerre). Les chaudières à condensation utilisent notamment cette technique, ce qui permet d'augmenter leur rendement.

À l'opposé, le pouvoir calorifique inférieur ne prend pas en compte la condensation de l'eau formée pendant la combustion. Cette eau reste à l'état gazeux et l'énergie qu'elle contient est perdue via la cheminée. Il s'agit donc de l'énergie sensible qui est contenue dans le combustible.

Dans le cadre de ce travail, il a été choisi de travailler en pouvoir calorifique inférieur. C'est pourquoi certains rendements peuvent être supérieurs à 100% dans le cas d'utilisation de chaudières à condensation. En effet, lorsque les chaudières condensent, de l'énergie est récupérée (sous forme de chaleur latente). Cette énergie est sommée à l'énergie dégagée lors de la combustion. Le rendement peut alors dépasser le rendement en chaleur sensible théorique du combustible (Chaudières à condensation [chauffage], 2007), (Combustion et combustibles, 2007), (Laguerre). Le PCI est exprimé en [kWh] par litre de mazout de chauffage ou de propane et par mètre cube de gaz naturel.

Pour rappel, le kilowattheure est utilisé pour désigner une quantité d'énergie qui correspond à la consommation énergétique d'un appareil électrique d'une puissance de 1000 watts fonctionnant pendant une heure. Il correspond à 3,6 MJ (Kilowattheure, 2019).

3.3.1.2. Type de combustible

L'ensemble de cette section est basé sur les ouvrages de référence suivants : (Choisir le combustible : bois, gaz et fuel, 2007), (ValBiom, Les coûts et les performances des installations de chauffage au bois, 2006), (Bombeck, 2020).

Différents types de combustibles peuvent être utilisés pour alimenter la chaudière : le propane, le gaz naturel, le mazout, le bois (pellets, plaquettes ou bûches). Il existe toute une série de critères qui peuvent influencer le choix vers l'un ou l'autre type de combustible. Voici une liste non exhaustive de différents paramètres décisifs dans ce choix.

L'impact environnemental est un critère important. On sait qu'à technologie similaire, le gaz produit 25% de CO_2 en moins que du mazout de chauffage, comme le montre la Figure 7. Cet argument peut être décisif lors du choix de la chaudière afin de réduire la production de gaz à effet de serre. Le bois, quant à lui, a un bilan CO_2 qui peut être considéré comme neutre, l'arbre ayant fixé du carbone pendant toute la durée de sa croissance. Cela n'est cependant vrai que si la forêt où il a été prélevé a été gérée de façon durable (labels FSC et PEFC). La production d'autres gaz que le CO_2 tels que les SO_2 , les NO_x ou les suies est également à prendre en compte. De ce point de vue, le gaz est le plus avantageux. Il faut également tenir compte de la politique fédérale en matière de carburant. En Belgique, le pacte énergétique belge interdira la vente de chaudières mazout à partir de 2035 (Choisir le combustible : bois, gaz et fuel, 2007).

Comparaison des prix et émissions en CO2 en fonction du combustible

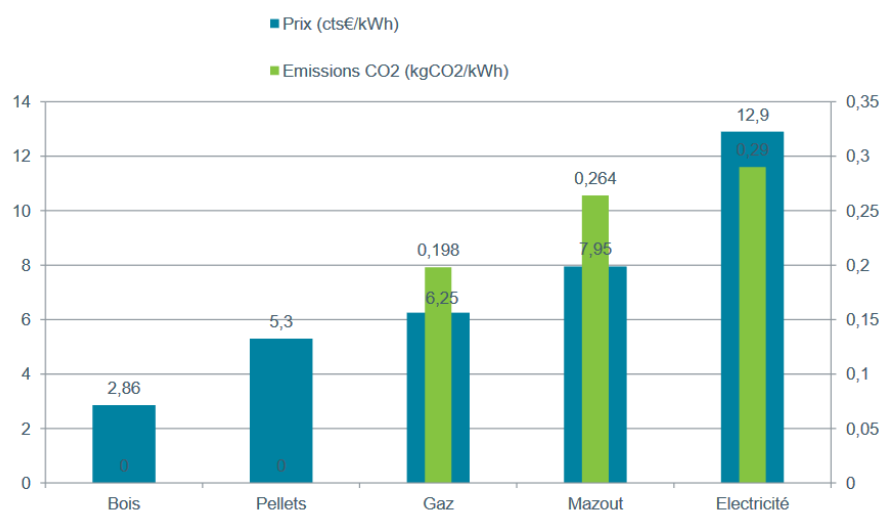


Figure 7 : Graphique comparatif des prix et émissions de CO₂ en fonction du combustible (Fronhoffs, 2015).

Le coût d'investissement va également être variable. Il est relativement semblable pour le gaz et le mazout de chauffage. Les chaudières à condensation seront plus chères à l'achat que des chaudières classiques, mais ce surcoût sera rentabilisé par les économies d'énergie réalisées provenant d'une augmentation de rendement de l'ordre de 6 à 10% (Choisir le combustible : bois, gaz et fuel, 2007), (Chaudières à condensation [chauffage], 2007). Les chaudières biomasse sont plus chères pour deux raisons : le prix de la chaudière est supérieur et il faut rajouter à cela des frais liés au stockage du bois (ou de ses dérivés) qu'il faut ensuite acheminer la matière vers la chaudière. Tous ces coûts sont très variables, mais sont globalement supérieurs à ceux d'une chaudière au gaz ou au mazout de chauffage. Les coûts d'investissement pour les différents types de chaudières sont repris dans le Tableau 3. Cependant, celles-ci peuvent rester concurrentielles, car le prix des différents types de bois reste inférieur. Leur rentabilité par rapport au mazout et du gaz dépend donc essentiellement du prix de ces derniers, qui peut fortement fluctuer d'une année à l'autre.

Tableau 3 : Estimation du prix des chaudières bois/mazout/gaz pour des puissances de 20 à 40 kW en Wallonie (janvier 2006) (ValBiom, Les coûts et les performances des installations de chauffage au bois, 2006).

	Chaudière avec brûleur (HTVA, livrée sans installation)	Puissance	Rendement
Chaudière bûches	1.500 – 3.000 €	~ 20 kW	70 - 85 %
	3.000 – 7.000 €	~ 40 kW	70 - 85 %
Chaudière pellets	5.000 ⁶ – 8.000 €	~ 20 kW	75 - 90 %
	10.000 – 11.000 €	~ 40 kW	75 - 90 %
Chaudière plaquettes	9.000 – 12.000 €	~ 20 kW	75 - 85 %
	12.000 – 17.000 €	~ 40 kW	75 - 85 %
Chaudière mazout	2.100 – 2.400 €	~ 20 kW	93 - 97 %
	2.700 – 2.800 €	~ 40 kW	93 - 97 %
Chaudière gaz à condensation	2.000 – 2.200 €	~ 20 kW	105 -107 %
	2.300 – 2.500 €	~ 40 kW	105 -107 %

Au niveau du volume de stockage, celui-ci varie en fonction du pouvoir calorifique du combustible. Pour rappel, un mètre cube apparent (MAP) correspond à un tas d'un mètre cube de plaquettes. À titre d'exemple, il est estimé qu'en moyenne un mètre cube de bois déchiqueté correspondra à un 2.5 à 3 MAP. Un MAP correspond donc à plus ou moins 0.4m³ de bois. Cela met en évidence les capacités de stockage nécessaires lorsqu'une chaudière bois est installée. Cependant, cela présente l'avantage de pouvoir être livré toute l'année et peu importe la localisation, ce qui est également vrai pour le mazout et le propane, le gaz naturel nécessitant un raccordement au réseau.

Les quantités ou volumes nécessaires de différents combustibles pour produire 1000 kWh sont consultables dans le Tableau 4. Il est important de souligner que les chiffres repris par ce tableau correspondent à la combustion de bois sec. Le taux d'humidité contenu dans le bois ainsi que le type d'essence peuvent sensiblement les faire varier.

Tableau 4 : Quantité de combustible nécessaire pour produire 1000 kWh (Wallonie, 2015).

Type de combustible	Quantité
Mazout	100 L
Gaz	100 m ³
Pellets	220 kg
Bûches	0,7 stère
Plaquettes	1 MAP (m ³ apparent)

Il existe une variabilité dans les coûts de fourniture des différents types de carburants, comme le montre la Figure 8. Ainsi, le mazout de chauffage et le gaz évoluent de manière relativement similaire, avec un décalage dans le temps (Senden G. , 2008). Le propane suit une tendance fluctuant de manière similaire au mazout en étant cependant légèrement plus cher au kWh la plupart du temps. Quant au prix du bois, il est inférieur et stable, mais varie sensiblement en fonction de sa forme : les plaquettes étant peu chères par rapport aux pellets qui reviennent à un prix similaire aux énergies fossiles. Le prix du bois en bûches est inférieur aux énergies fossiles, mais varie en fonction de différents facteurs comme le type de conditionnement (bois du pied, en bûches de différentes dimensions (1m, 0.5m, 0.33m)), la distance de livraison, le temps de séchage (bois frais ou sec de 2 ans), l'essence considérée (feuillu ou résineux) ainsi que de la région (prix inférieur en zone forestière comme la province du Luxembourg par rapport à Bruxelles par exemple).

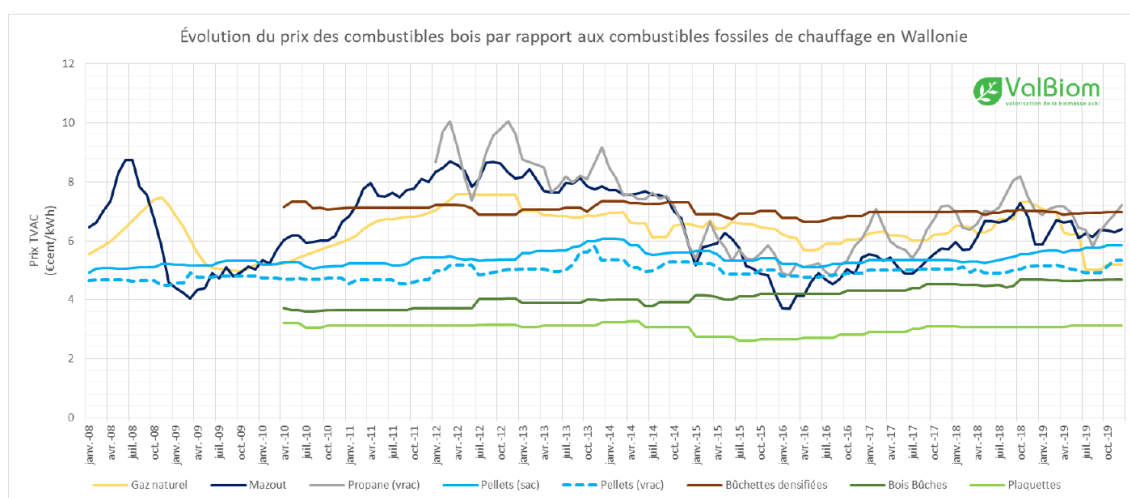


Figure 8 : Évolution du prix des combustibles bois, mazout, gaz naturel et propane de janvier 2008 à décembre 2019 (Bombeck, 2020).

Globalement les énergies fossiles ont un coût de revient supérieur au bois, à l'exception du bois en bûchettes densifiées qui est plus cher depuis fin 2014, comme le montre la Figure 8. Il est également observable que le bois en plaquettes et en bûches est en légère hausse, mais présente une bonne stabilité sur les 10 dernières années. À l'inverse, le prix des énergies fossiles n'a cessé de fluctuer, leur coût étant difficilement prédictible pour l'avenir. Le bois en plaquettes est le plus avantageux d'un point de vue économique, mais il est important de rappeler que la composition de celui-ci est très variable, ce qui peut sensiblement faire varier son coût au kWh.

Dans le cadre de ce travail, seules les chaudières fonctionnant au mazout de chauffage, au gaz naturel et au propane ont été prises en compte. En effet, la grande variabilité inhérente au stockage et à l'acheminement du bois vers la chaudière ne permettait pas d'estimer les coûts liés à l'installation d'une telle chaudière. La disponibilité d'un espace de stockage ainsi que les travaux d'aménagement de celui-ci ne sont pas quantifiables via une étude comme celle-ci. Ceci implique de connaître en détail le site d'installation et ces données ne sont pas généralisables. De plus, les coûts liés à la forme du bois utilisé (plaquettes, bûches ou pellets) fluctuent beaucoup en fonction des régions et de la distance d'approvisionnement entre le fournisseur et le consommateur, ce qui rend l'estimation du coût de revient d'un tel carburant difficile. Enfin, la logistique induite par l'utilisation du bois en bûches par exemple nécessite d'être prise en compte pour calculer le potentiel bénéfice apporté par son utilisation. Ceci requiert une étude plus approfondie afin d'approximer précisément le résultat, ce qui ne peut s'effectuer que par une étude de faisabilité précise.

3.3.1.3. Rendement

La chaudière doit avoir un rendement élevé afin de réduire les coûts énergétiques générés par l'entreprise. Elle représente dès lors le premier élément à analyser pour arriver à cet objectif.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour chauffer le moult (chauffe à la flamme directe, production d'ECS via la chaudière, chauffe à la vapeur). De plus, toutes les brasseries sont construites différemment et la chaudière peut être utilisée pour d'autres applications comme le chauffage des locaux ou de la chambre chaude ainsi que la production d'eau chaude sanitaire par exemple. Cela induit un rendement saisonnier de la chaudière. Celui-ci est calculé sur toute la saison de chauffe et correspond au rapport entre l'énergie réellement transmise à l'eau utilisée par le circuit de chauffage et l'énergie qui est contenue dans le combustible. Il se différencie du rendement utile, car il prend également en compte les pertes durant l'arrêt du brûleur. Ce rendement diminue notamment en été lors de la production d'eau chaude sanitaire par exemple. En effet, le système de chauffage étant à l'arrêt durant cette saison, le brûleur s'allume et s'éteint pour de petites quantités d'eau ce qui induit une diminution du rendement (Evaluer l'efficacité énergétique de la production d'eau chaude sanitaire, 2007). Toute une série d'autres facteurs va aussi influencer le rendement comme les pertes à l'arrêt et au démarrage du brûleur, les pertes vers la chaufferie, le balayage du foyer, le surdimensionnement, (Rendement d'une chaudière, 2017).

La prise en compte de la variabilité saisonnière est complexe et nécessite une étude approfondie de l'entreprise, ce qui n'est pas l'objectif de cet outil qui a pour vocation de déterminer de manière rapide et simple l'impact d'un investissement au sein de l'entreprise. C'est pourquoi le rendement sera celui de la chaudière fonctionnant à puissance maximale et sera considéré comme constant tout au long de l'année.

Le rendement nominal peut être trouvé dans la documentation technique fournie par le constructeur de la chaudière. Il correspond au rendement dans des conditions idéales et ne tient donc pas compte des pertes des fumées qui sont évacuées par la cheminée ainsi que les pertes par radiation/convection vers la chaufferie comme le montre la Figure 9. Ces dernières sont appelées pertes d'ambiance et

proviennent de la masse d'eau chaude ainsi que des parties non irriguées de la chaudière qui sont exposées au rayonnement de la flamme du brûleur (parois sèches) (Rendement d'une chaudière, 2017).

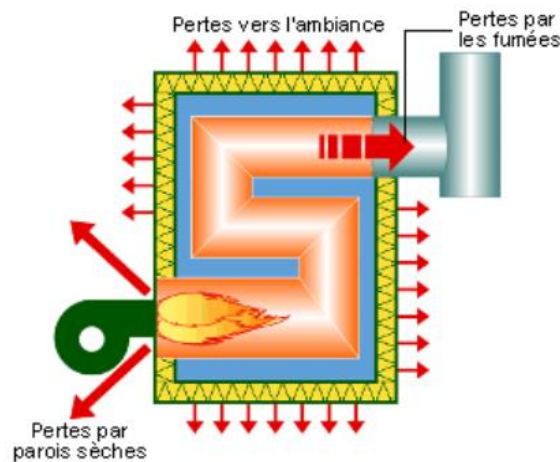


Figure 9 : Pertes d'une chaudière en fonctionnement (Rendement d'une chaudière, 2017).

Une seconde méthode pour déterminer le rendement consiste à faire appel à un chauffagiste qui réalisera une analyse des fumées de combustion de la chaudière. Cette analyse est réalisée lorsque la chaudière fonctionne au maximum de ses capacités. Le rendement de combustion pourra directement être trouvé sur celui-ci. Il est également à noter que ce rendement est donné en PCI. Une valeur inférieure à 88% est considérée comme mauvaise et une amélioration doit être envisagée (Interpréter la fiche d'entretien d'une chaudière, 2007). Il est cependant important de souligner que ce rendement est instantané et ne reflète donc pas le rendement saisonnier. Dans le cadre de ce travail, la chaudière étant considérée comme n'intervenant que pour le process, cette valeur peut donc être considérée comme proche de la réalité. Dans le cas où la chaudière servirait également à un système de chauffage ou à la production d'ECS, ce résultat peut également être utilisé tout en gardant à l'esprit qu'il n'est pas représentatif sur une année entière et que le rendement réel annuel est inférieur à cette valeur.

3.3.1.4. Facteur de charge

Le facteur de charge (**Facteur_{charge}**) représente le temps de fonctionnement du brûleur par rapport au temps d'utilisation de la chaudière (Estimer le surdimensionnement d'une chaudière, 2007). Il est calculé via l'équation suivante :

$$Facteur_{charge} = \frac{nB}{nT} [\%]$$

Où

- **nB** est le nombre d'heures durant lesquelles le brûleur fonctionne annuellement [h].
- **nT** est le nombre d'heures qui constituent la saison de chauffe [h], à savoir environ 5800 heures en moyenne Belgique et 6500 en haute Belgique ainsi qu'au sud du sillon Sambre et Meuse.

Plus le facteur de charge est faible, plus la chaudière est surdimensionnée, ce qui induit des pertes d'énergie. Au-delà de 20%, le facteur de charge est considéré comme optimal (Dethier, 2010).

3.3.1.5. Chaudière Vapeur

La plupart des nouvelles installations brassicoles actuelles fonctionnent en utilisant la vapeur comme fluide caloporteur. Les chaudières vapeur sont principalement utilisées pour fournir l'énergie thermique nécessaire au processus brassicole et rentrent donc parfaitement dans le cadre de cette étude. Enfin, elles sont compatibles avec un économiseur permettant de récupérer la chaleur des fumées de combustion qui sera étudié ultérieurement dans ce travail.

3.3.1.5.1. Notions élémentaires sur la vapeur

L'utilisation de la vapeur comme fluide caloporteur est intéressante pour diverses raisons : son coefficient de transfert thermique est supérieur à celui d'autres fluides comme l'eau surchauffée ou l'huile thermique. De plus, chaque kilogramme de vapeur transporte une quantité de chaleur importante. Cette énergie sous forme de chaleur se présente sous deux formes : la chaleur sensible et la chaleur latente. La première correspond à l'énergie qui modifie la température d'une matière. Dans le cas de la d'un kilogramme de vapeur à pression atmosphérique, cela équivaut à l'énergie qui est nécessaire pour chauffer un litre d'eau de 0°C à 100°C. La chaleur latente, quant à elle, modifie l'état physique d'une matière. Ici, il s'agit de la chaleur nécessaire pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux (Chaleur sensible et chaleur latente, 2007). La répartition de la chaleur latente et de la chaleur sensible dans un kilogramme de vapeur à pression atmosphérique est visible sur la Figure 10.

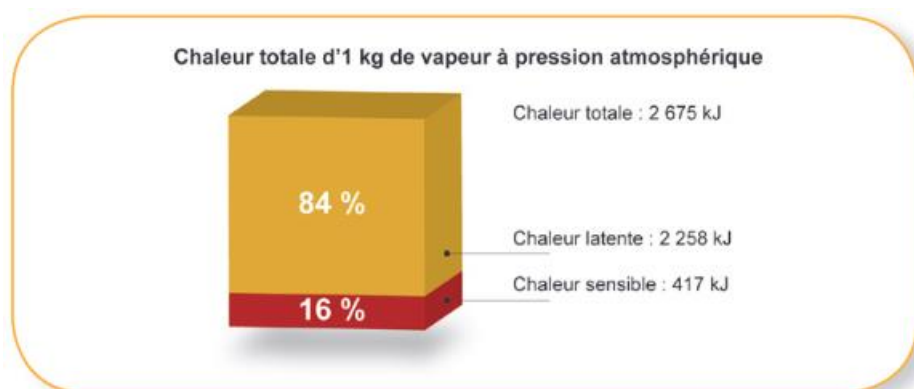


Figure 10 : Chaleur totale d'un kg de vapeur à pression atmosphérique ((ICEDD) & Econotec, 2010).

Lorsque la pression augmente, cette répartition se modifie. La chaleur totale augmente faiblement, mais la proportion de chaleur sensible va augmenter, car la température de saturation va s'accroître également tout en diminuant la quantité de chaleur latente que la vapeur pourra contenir ((ICEDD) & Econotec, 2010). Un rapide aperçu de l'évolution de la température de saturation, du volume spécifique ainsi que de la chaleur sensible et latente sous l'effet d'une augmentation de pression est consultable dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Evolution des caractéristiques d'un kg de vapeur sous l'effet d'une augmentation de pression ((ICEDD) & Econotec, 2010).

Caractéristiques de la vapeur saturée :	Exemples :		
• Pression (barg = bar relatif)	0	5	10
• Température de saturation (°C)	100	158,9	184,2
• Chaleur sensible (kJ/kg)	419,1	671,1	781,7
• Chaleur latente (kJ/kg)	2256,7	2085,7	1999,7
• Volume spécifique (m³/kg)	1,6736	0,3150	0,1773

D'autres avantages sont également à souligner, comme l'utilisation d'une tuyauterie de faible diamètre (car le volume massique de la vapeur décroît quand la pression augmente) et il existe un retour du fluide sous forme de condensats liquides, ce qui permet une économie d'énergie (les condensats sont stockés puis réinjectés dans la chaudière pour reformer de la vapeur).

La vapeur présente cependant certains risques tels que des « coups de béliers » ou « claquements » ((ICEDD) & Econotec, 2010). Ceux-ci peuvent apparaître pour deux raisons. La première est la formation de condensat dans les conduites suite à des pertes de chaleur rayonnante. La vapeur circulant à grande vitesse dans la tuyauterie entraîne le condensat qui forme une sorte de vague à l'origine du « coup de bélier » quand elle entre au contact d'une vanne ou d'un joint. La seconde origine est la condensation soudaine de la vapeur au contact d'une surface froide. Lorsque la vapeur condense, son volume diminue fortement. Si la condensation se produit de manière soudaine, un vide est momentanément créé et est à l'origine du « coup de bélier » (Coups de bélier : le mécanisme, s.d.). Un autre inconvénient majeur de la vapeur est son coût qui peut varier entre 15€ et 30€ la tonne.

D'un point de vue brassicole, l'utilisation de la vapeur, bien que plus onéreuse que d'autres techniques, est intéressante, car elle permet une chauffe plus homogène du moût. L'utilisation de cuve double-enveloppe permet le chauffage à la vapeur comme l'illustre la Figure 11. La vapeur va circuler entre ces deux parois et céder son énergie en se condensant. C'est ainsi que la chaleur latente contenue dans la vapeur est transmise au moût. Il s'agit d'un système de chauffage indirect en comparaison avec un système de chauffe à la flamme (chauffage direct). Ce type de système permet d'avoir une surface d'échange supérieure avec la source chaude, avec comme résultat un chauffage plus rapide et plus homogène du moût.

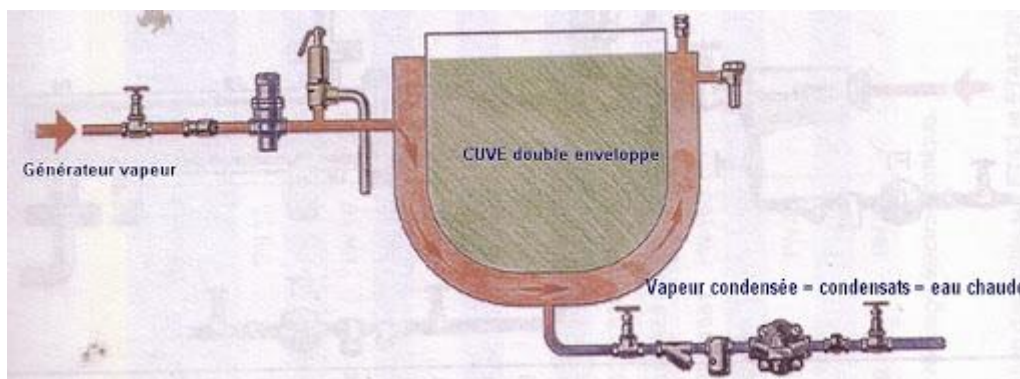


Figure 11 : Illustration du fonctionnement d'une cuve double enveloppe (Comment la vapeur fournit-elle un chauffage rapide ?, s.d.).

La principale différence entre un système de chauffe à la vapeur et un système de chauffe à l'huile thermique ou à l'eau chaude est que la vapeur change d'état contrairement aux deux autres fluides qui se refroidissent. Cela permet un effet de chauffage nettement supérieur, ce qui se traduit par le fait que pour une même surface d'échange, le temps de chauffe est réduit avec la vapeur. Elle permet également une chauffe homogène (si la pression est maintenue constante) (Transfert de chaleur de la vapeur, s.d.).

3.3.1.5.2. Chaudière vapeur à tubes de fumées

Ce premier type de chaudière vapeur fonctionne en faisant circuler la flamme et les fumées dégagées par la combustion à l'intérieur de tubes qui sont eux-mêmes entourés par l'eau à chauffer. Cette eau est contenue dans un grand corps cylindrique entourant l'ensemble. Un schéma de ce type de chaudière est montré sur la Figure 12.

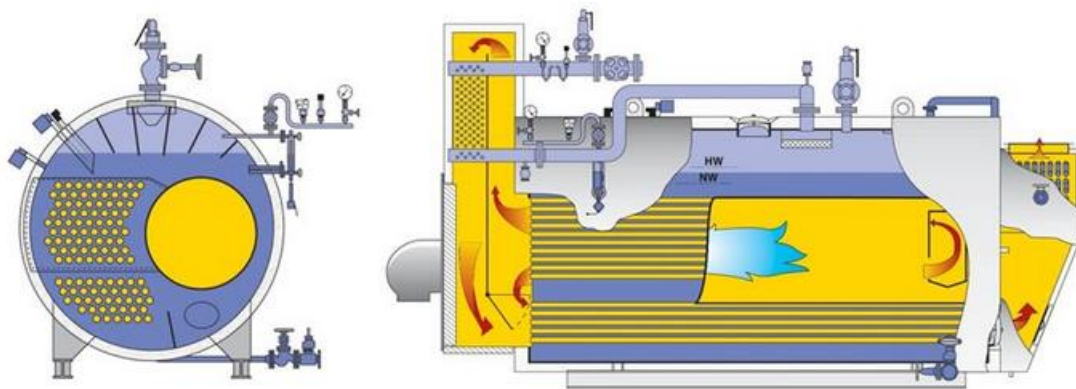


Figure 12 : Schéma de principe d'une chaudière à tubes de fumées (Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, 2012).

La flamme va chauffer l'eau environnante et la fumée va suivre le réseau de tuyauterie tout en se refroidissant. De cette manière, un maximum d'énergie sera transmise à l'eau. Cependant, ce type de chaudière a comme désavantage d'avoir une grande inertie thermique et de ce fait un démarrage lent. Un risque d'explosion reste présent, car beaucoup d'eau se transforme rapidement en vapeur. La gamme de puissance de ce type de chaudière va de 100 kW à 30 MW (Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, 2012).

3.3.1.5.3. Générateur vapeur

À l'inverse de la chaudière vapeur à tube de fumées, l'eau circule dans un système de tuyauteries et non plus la flamme et les fumées. La puissance est variable et peut aller de très faibles puissances jusqu'à atteindre des puissances très élevées. Pour les installations de petite à moyenne taille, l'installation est composée d'une chambre de combustion de forme cylindrique qui est entourée d'un serpentin d'eau terminé par un séparateur eau/vapeur comme le montre la Figure 13.



Figure 13 : Illustration et schéma de fonctionnement d'un générateur vapeur (Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, 2012).

Ces générateurs présentent l'avantage d'avoir un démarrage rapide (faible inertie thermique). De plus, le risque d'explosion est presque nul. Ils peuvent s'adapter rapidement à une variation brusque de la demande en vapeur, ce qui donne une bonne flexibilité au sein du process. Ils conviennent particulièrement bien pour des procédés industriels intermittents. C'est la raison pour laquelle on

rencontrera principalement des générateurs vapeur en brasserie (Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, 2012).

3.3.2. Récupération d'énergie durant l'ébullition

3.3.2.1. L'ébullition

L'ensemble de cette section est basé sur les ouvrages de référence suivants : (Faiveley, 2020), (Mosher & Trantham, 2017), (Willaert, The Beer Brewing Process : Wort Production and Beer Fermentation, 2007), (Différents types d'échangeurs de chaleur, 2015).

Comme expliqué précédemment dans ce travail, le moût va devoir être porté à ébullition afin d'éliminer des micro-organismes ainsi que des composants organiques et inorganiques indésirables lors de la fermentation ultérieure. Cette étape va également permettre l'ajout du houblon au moût et ainsi laisser les acides houblonnés délivrer l'amertume désirée à la future bière. Cela aide à éliminer une partie du dimethylsulfure (DMS) contenu dans le moût qui donne un mauvais goût ainsi qu'une mauvaise odeur à la bière. Il s'agit d'un composé très volatil pouvant être éliminé via la vapeur produite lors de l'ébullition. Le temps d'ébullition devra être déterminé avec soin afin que le produit fini présente une bonne balance entre la concentration en DMS et la teneur en azote coagulable. Par exemple, un temps d'ébullition trop court induira une teneur en DMS trop élevée et une teneur en azote acceptable. À l'inverse, une ébullition trop longue induira une teneur en azote coagulable trop faible. L'ébullition va également permettre d'éliminer d'autres composés organiques volatils (VOC). Ceux-ci peuvent être classés en 3 groupes : les dérivés du malt volatiles, les huiles de houblon ainsi que d'autres composés volatils formés pendant l'ébullition. Il a été démontré qu'une réduction de 2% du taux d'évaporation n'a pas d'impact sur le goût ou d'autres qualités de la bière. En outre d'autres raisons peuvent être retenues pour porter le moût à ébullition. Celles-ci sont notamment détaillées dans l'ouvrage de Michael Mosher et Kenneth Trantham, « Brewing Science, A Multidisciplinary Approach », dans la section consacrée à l'ébullition du moût.

De nos jours, cette opération est réalisée dans des cuves en acier inoxydable avec différentes caractéristiques qui améliorent leur conductivité thermique (K). Celle-ci va influencer la manière dont la chaleur va être transférée à travers le métal au liquide contenu à l'intérieur de la cuve et est exprimée en $[Wm^{-1}K^{-1}]$. Plus sa valeur sera élevée, meilleure sera la conductivité du matériau. Le but recherché est de transférer la chaleur rapidement au moût afin qu'il se réchauffe jusqu'à ébullition. Il faudra ensuite maintenir cette température tout au long du cycle d'ébullition.

Malgré des améliorations dans la qualité des matériaux ainsi que dans les techniques de chauffe utilisées lors de l'ébullition, celle-ci reste une étape très énergivore au sein du processus brassicole. L'ébullition consiste donc à porter le moût à une température de 100°C (si elle a lieu à pression atmosphérique) et de maintenir cette température pendant environ 90 minutes. Le taux d'évaporation peut être estimé à environ 8% à 12% de la capacité de la cuve d'ébullition, ce qui correspond à une quantité de vapeur d'environ 10 kilogrammes par hectolitre de bière. L'énergie nécessaire pour chauffer le moût durant l'ébullition est quant à elle estimée à environ 14 kWh par hectolitre (Faiveley, 2020). L'ébullition représente jusqu'à 15% de l'énergie thermique nécessaire au brassage d'une bière.

3.3.2.2. Techniques utilisées pour réaliser l'ébullition

Deux méthodes peuvent être utilisées pour chauffer le moût : la chauffe directe et la chauffe à la vapeur.

3.3.2.2.1. Chauffe à flamme directe

La première méthode consiste à utiliser un brûleur au gaz ou des résistances électriques. Cependant, l'utilisation de résistances électriques est très énergivore et chère, ce qui n'est pas viable dans des

brasseries industrielles. L'utilisation d'un brûleur au gaz présente l'avantage d'être facilement mise en place, mais nécessite un nouveau brûleur ainsi qu'une nouvelle arrivée de combustible lors de l'ajout d'une nouvelle cuve. Dans ce cas, le système de chauffe est situé directement sous la cuve, en contact avec le métal constituant le dessous de la cuve. Généralement, les cuves chauffées à flamme directe ont tendance à avoir un fond concave qui conserve la chaleur et la maintient en contact avec le fond de la cuve pour améliorer le transfert de chaleur avec le liquide contenu à l'intérieur. Quand le liquide va chauffer, sa densité va diminuer et il va monter vers le haut de la cuve. Cela va créer un mouvement de bas en haut et de l'extérieur vers l'intérieur de la cuve. Il faut faire attention à la surface de contact entre le liquide et le fond de la cuve, il y a des risques que le moût brûle et entraîne une caramélisation des sucres ou d'autres réactions provoquant une détérioration de la future bière. Le taux d'évaporation de cette méthode avoisine les 10% de l'eau contenue dans la bière par heure. À long terme, ce type de système de chauffe est moins rentable qu'un système fonctionnant à la vapeur. Une cuve d'ébullition avec un système de chauffe à flamme directe est visible sur la Figure 14. L'arrivée du carburant est visible en bas à gauche.



Figure 14 : Cuve d'ébullition fonctionnant avec un système de chauffe à flamme directe (Cuves ébullition GAZ - 100 à 800 Litres, s.d.).

3.3.2.2.2. Chauffage indirecte à la vapeur

La seconde méthode consiste à produire de la vapeur et à la transporter à travers un système de tuyauteries isolé vers la cuve d'ébullition (cuve à double paroi visible sur la Figure 11). La vapeur circule alors entre ces deux parois, transférant sa chaleur latente au liquide contenu dans la cuve. L'échange de chaleur a lieu par les parois ainsi que par le fond de la cuve, la surface d'échange étant donc nettement supérieure à celle utilisée lors de la chauffe directe. La différence de température entre la vapeur et le liquide étant plus faible qu'avec une chauffe à flamme directe et la surface d'échange étant plus grande, le risque que le moût brûle ou caramélise est minimisé. Cette méthode est en revanche plus onéreuse et requiert des protocoles de sécurité ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée pour utiliser la vapeur. Cependant, la vapeur possède différents avantages, car elle est plus rentable sur le long terme et permet à la brasserie de s'agrandir aisément en connectant les nouveaux équipements au réseau de vapeur déjà existant. Le rendement d'une chaudière à vapeur est généralement plus élevé et produit donc moins d'émissions qu'un système de chauffe à flamme directe.

La vapeur apportant une chauffe plus douce et limitant ainsi le risque de caramélisation du moût est un atout majeur pour la qualité du produit fini. C'est pourquoi la plupart des brasseries actuelles sont équipées d'un système de chauffe à la vapeur.

3.3.2.3. Techniques de récupération existantes

Actuellement, trois méthodes sont principalement utilisées pour récupérer de l'énergie lors de l'ébullition.

3.3.2.3.1. Diminution du taux d'évaporation grâce à l'usage d'une calandre externe

Une première façon d'économiser de l'énergie est d'en perdre moins. En réduisant le taux d'évaporation lors de l'ébullition, moins d'énergie est dès lors perdue sous forme de vapeur. Une de ces techniques consiste à utiliser une calandre pour chauffer le moût et un cône de déflexion servant à l'épandre et à le renvoyer vers le bas de la cuve. L'idée est d'utiliser le mouvement convectif que va subir le moût en étant chauffé pour le réinjecter dans le haut de la cuve via ce cône. Le moût est alors chauffé dans cette calandre qui peut être interne ou externe à la cuve comme le montre la Figure 15. Le moût circule dans des tuyaux en cuivre à l'intérieur de celle-ci. Ces tuyaux sont entourés par une gaine en acier inoxydable à l'intérieur de laquelle de la vapeur est injectée. L'usage d'une calandre interne est néanmoins peu pratique, car elle nécessite d'être complètement immergée dans le moût, car elle fonctionne uniquement via le mouvement convectif du liquide, contrairement à la calandre externe. De plus, si le moût caramélise à l'intérieur, le nettoyage de la calandre sera très compliqué si celle-ci se situe à l'intérieur de la cuve d'ébullition, même si un système CIP est utilisé.

L'usage d'une calandre externe est donc plus pratique d'un point de vue encrassement et nettoyage, car une pompe est utilisée, ce qui permet une circulation permanente du moût et réduit donc les risques de caramélisation. De plus, ce système permet un gain de temps, car il ne nécessite pas que la cuve soit remplie pour commencer à chauffer le moût. Ce système n'est toutefois pas parfait, car l'utilisation d'une pompe peut perturber le processus de formation de certaines protéines et certaines cuves ne sont pas compatibles avec son utilisation. Cette technique permet d'abaisser le niveau d'évaporation à environ 5% par heure durant l'ébullition tout en conservant les réductions nécessaires en composés organiques volatiles comme le DMS par exemple.

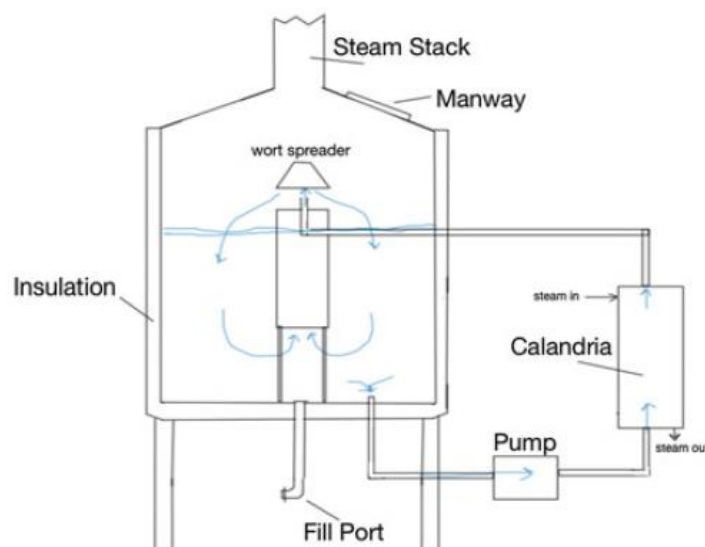


Figure 15 : Schéma de principe d'une cuve d'ébullition utilisant une calandre externe et un cône de déflexion (Mosher & Trantham, 2017).

3.3.2.3.2. Diminution de la consommation énergétique en abaissant la pression dans la cuve d'ébullition

Une seconde façon de minimiser la consommation énergétique lors de cette étape est de diminuer la pression dans la cuve d'ébullition. Cela va abaisser la température d'ébullition du moût et favoriser son évaporation, ce qui va diminuer le temps de chauffe et donc la consommation énergétique. Cela peut diminuer la consommation énergétique à 9 kWh par hectolitre.

Des systèmes dynamiques existent également (dynamic low-pressure boiling), faisant varier la pression au sein de la cuve d'ébullition. Cette technologie fonctionne en ouvrant/fermant le condenseur, ce qui a pour effet de modifier la pression au sein de la cuve. Ceci s'effectue sur de courtes phases de 3 à 5 minutes. Lorsque le condenseur s'ouvre, la pression diminue et l'évaporation s'effectue brutalement, libérant les VOC indésirables. À l'inverse, la pression augmente lorsqu'il est en position fermée. Cependant, ce genre de technologie n'est utilisé que dans des brasseries de taille industrielle car elle nécessite l'installation de cuves résistantes à la variation de pression. Cela représente un coût important et nécessite donc le brassage de volumes importants afin de rentabiliser un tel investissement.

3.3.2.3.3. Récupération d'énergie en condensant les vapeurs produites lors de l'ébullition

La troisième méthode consiste à utiliser un condenseur de vapeur sur la cuve d'ébullition. La vapeur contenant une grande quantité de chaleur latente, il est intéressant de la condenser afin de récupérer celle-ci. Pour rappel, 1 kg de vapeur condensée en 1 kg d'eau à 100°C produit environ 2260 kJ. Un échangeur à plaques d'un seul étage peut servir de condenseur. De l'eau froide y circule dans un sens et la vapeur dans l'autre. De l'eau est ainsi chauffée pour les brassins ultérieurs. Afin de maximiser la récupération énergétique, deux bâches de stockage d'eau chaude peuvent être utilisées. La première accueillant de l'eau à 99°C, la seconde contenant de l'eau à une température moindre. Dans le système illustré sur la Figure 16, de l'eau à 78°C va circuler dans l'échangeur vapeur-eau (4) afin de refroidir les vapeurs provenant de l'ébullition. Le condensat sera évacué à l'égout. En refroidissant la vapeur, cette eau va être réchauffée à 99°C. Elle pourra être stockée à l'étage supérieur de la cuve d'eau chaude ou envoyée directement vers l'échangeur préchauffant le moût avant ébullition (3). L'eau sera alors refroidie à 78°C et pourra être stockée dans l'étage inférieur de la cuve d'eau chaude ou recommencer la boucle vers l'échangeur vapeur-eau. Les condensats peuvent être refroidis avant d'être évacués via un échangeur à une température de 30°C, ce qui est également une source d'eau chaude.

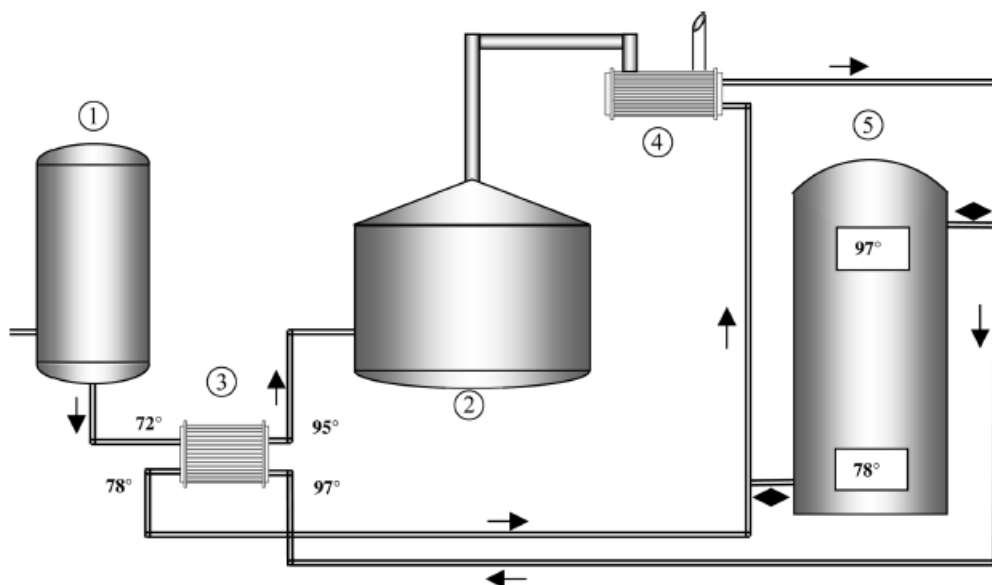


Figure 16 : Cuve d'ébullition équipée d'un condenseur de vapeur (non pressurisé) ainsi que d'une cuve de stockage d'eau chaude (5) et d'un préchauffeur de moût avant ébullition (3) (Vollhals, 1994) ; 1- cuve collectrice de moût, 2- cuve d'ébullition, 3- échangeur préchauffeur de moût, 4- condenseur de vapeur, 5- cuve de stockage d'eau chaude.

La vapeur peut également être compressée de quelques dixièmes de bar afin de lui faire atteindre une température allant de 102°C à 108°C et est alors réutilisée pour maintenir le moût en ébullition, la montée en température étant effectuée grâce à de la vapeur provenant de la chaudière. Cette opération est réalisée en utilisant un compresseur mécanique ou un compresseur à vapeur. Les condensats obtenus par condensation de la vapeur sont éliminés via un refroidisseur de condensat, produisant de l'eau chaude. Ce procédé ne permet cependant pas de préchauffer le moût après la filtration, car toute la vapeur est utilisée par le compresseur. D'autres désavantages sont également à souligner comme une implémentation difficile dans le process, des coûts d'entretiens élevés ou encore des pics de consommation électrique.

D'autres techniques comme l'ébullition du moût à haute température (donc en augmentant la pression au sein de la cuve) où grâce à des systèmes d'extraction des VOC par aspiration existent également. Le coût, le bénéfice ainsi que l'intégration au sein de la brasserie des différentes technologies vues précédemment sont détaillés dans le Tableau 6. Celui-ci montre que l'investissement dans un condenseur de vapeur est moindre en comparaison avec les autres technologies étudiées. De plus, celui-ci présente l'avantage d'être facilement intégré dans le système déjà existant. C'est pourquoi l'implémentation de cette technologie a été retenue dans le cadre de ce travail.

Tableau 6 : Comparaison des principales technologies utilisées pour l'ébullition inspiré de (Willart & Baron, 2005).

Système d'ébullition	Intégration dans le système existant	Réduction des coûts d'opération	Coût de l'investissement
Système d'ébullition classique			
Ventilation atmosphérique ³	-	-	-
Condenseur de vapeur	+++	+	+
Compresseur de vapeur	-	+	+++
Ébullition basse pression			
Ébullition classique	- ⁴	++	+++
Ébullition dynamique	- ⁴	++	+++
Ébullition à haute température	-	+++	+++

3.3.3. Récupération d'énergie lors du refroidissement du moût

L'ensemble de cette section est basé sur les articles de référence suivants : (Mosher & Trantham, 2017), (Fonctionnement d'un échangeur à plaques, s.d.), (Différents types d'échangeurs de chaleur, 2015), (Echangeur à plaques, 2007).

Cette technique consiste à récupérer de l'énergie thermique contenue par le moût lors de son refroidissement avant la fermentation. En effet, le moût est trop chaud après l'ébullition; son refroidissement est nécessaire afin de permettre aux levures de se propager pendant la fermentation. Si la brasserie est équipée d'un whirlpool, cette opération peut s'effectuer en deux étapes. Tout d'abord, il faudra refroidir le moût à une température de 89°C. Différentes études ont prouvé les bienfaits de ce premier palier sur la stabilité du goût de la bière. Un second palier de refroidissement amenant le moût à sa température de fermentation (18-22°C) sera ensuite effectué. Si la brasserie ne dispose pas de whirlpool, ce refroidissement est effectué en une fois. L'énergie ainsi récupérée pourra être utilisée pour préchauffer le moût avant ébullition ou pour produire de l'eau chaude. Cette étape doit être effectuée rapidement et de manière aseptique afin d'éviter la propagation de bactéries ou autres microorganismes.

Ce refroidissement est effectué à l'aide d'un échangeur thermique. Le principe de ces échangeurs est de transférer l'énergie d'un fluide à un autre par conduction au travers des parois séparant les deux fluides comme l'illustre la Figure 17. L'énergie va toujours aller du fluide le plus chaud vers le fluide le plus froid lorsqu'ils sont en contact physique. La quantité de chaleur transférée par unité de temps dépend notamment de la conductivité thermique du matériau conducteur, de son épaisseur ainsi que de la différence de température de part et d'autre de celui-ci. Ce transfert de chaleur entre les deux fluides va être régi par l'équation de chaleur de Fourier (Équation 5) :

$$\frac{Q}{t} = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Équation 5 : Équation de chaleur de Fourier (Mosher & Trantham, 2017).

³ Ébullition classique atmosphérique avec une ventilation atmosphérique prise comme situation de référence

⁴ Les cuves d'ébullition classiques ne permettent pas l'ébullition sous pression ; l'ébullition à basse pression nécessite l'installation de cuves coûteuses résistantes à la pression.

Où

- Q/t est la quantité d'énergie calorifique transférée par unité de temps [W] ;
- ΔT est la différence de température des fluides de part et d'autre du matériau conducteur [K] ;
- Δx est l'épaisseur du matériau conducteur séparant les deux fluides [m] ;
- A est la surface d'échange du matériau conducteur [m²] ;
- K est la conductivité thermique [W m⁻¹ K⁻¹].

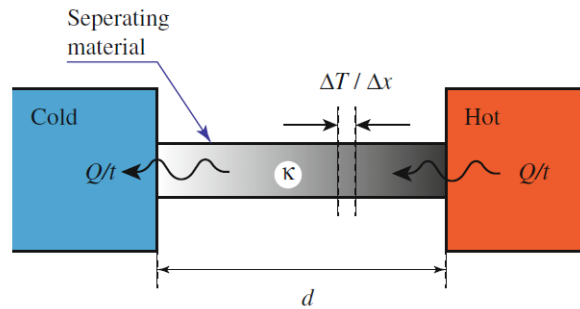


Figure 17 : Illustration d'un transfert de chaleur au travers d'un matériau métallique entre deux fluides (Mosher & Trantham, 2017).

Au vu de l'équation de Fourier (Équation 5), plus le matériau est fin (Δx petit), et sa conductivité thermique (κ) élevée, plus la quantité d'énergie calorifique transportée par seconde sera grande. Différentes valeurs de conductivité thermique en fonction du type de matériau peuvent être consultées dans le Tableau 7. Ce tableau montre que le matériau ayant la meilleure conductivité thermique est l'argent, suivi par le cuivre. Malgré une conductivité élevée, l'argent n'est pas utilisé pour la fabrication d'échangeurs à cause de son prix élevé et d'une forte malléabilité qui exigerait une épaisseur conséquente afin de le rigidifier. A contrario, l'eau présente une conductivité très faible.

Tableau 7 : Conductivité thermique de différents matériaux à 20°C inspiré par (Mosher & Trantham, 2017).

Type de matériau	κ [W/m K]
Eau	0,6
Acier inoxydable	14
Aluminium	205
Cuivre	380
Argent	429

Malgré une conductivité faible ($\kappa = 14$), les échangeurs sont conçus avec de l'acier inoxydable. Ce métal offre différents avantages comme celui d'être facilement nettoyable et il ne réagit pas avec le moût acide. De plus, c'est un matériau dur comparé au cuivre, il ne faut donc qu'une fine épaisseur d'acier inoxydable pour arriver à la même résistance que le cuivre, ce qui compense sa conductivité faible. Au fil du temps, la différence de température entre les deux fluides va diminuer et, de facto, la quantité de chaleur transférée. La quantité de chaleur échangée va donc suivre une forme logarithmique.

Les échangeurs actuels se distinguent les uns des autres par leur surface d'échange. Plus celle-ci est grande, plus l'échange de chaleur sera important. Il existe deux types d'échangeurs thermiques : les échangeurs à co-courants et les échangeurs à contre-courant. Il est important de souligner que pour chacun des deux types d'échangeurs, la température de sortie souhaitée peut également être obtenue en régulant le débit d'écoulement des deux fluides.

Dans un échangeur à co-courant, le fluide froid et le fluide chaud vont circuler dans le même sens dans l'échangeur comme l'illustre la Figure 18. Les fluides circulant dans les mêmes directions, l'échange va être progressif, le fluide froid se réchauffant et inversement pour le fluide chaud.

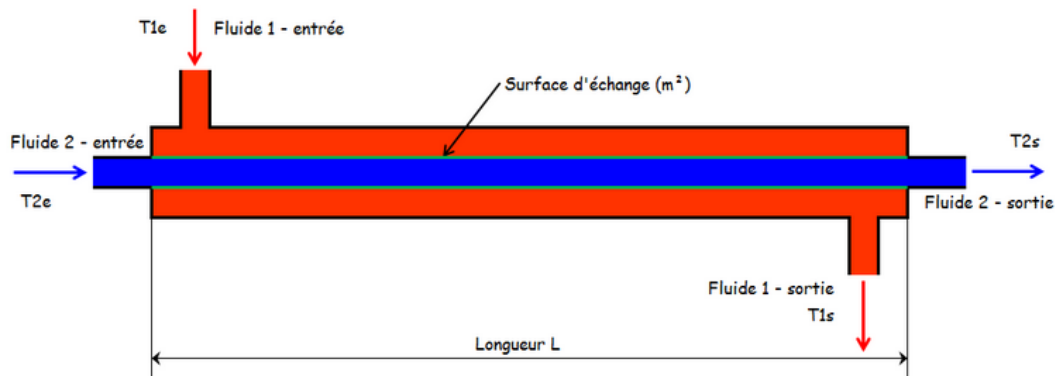


Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à co-courant (Différents types d'échangeurs de chaleur, 2015).

Sur une longue période de temps ou en augmentant considérablement la surface d'échange, la température des deux fluides tendra à s'équilibrer comme le montre le graphique gauche de la Figure 19. Au départ, un grand échange a lieu entre les deux fluides, car la différence de température est grande. Au fur et à mesure de leur déplacement dans l'échangeur, la différence de température va diminuer, de même que le transfert de chaleur. Les températures vont devenir de plus en plus proches jusqu'à atteindre une température d'équilibre. De ce fait, la température de sortie du fluide chaud ne pourra jamais être inférieure à celle du fluide froid.

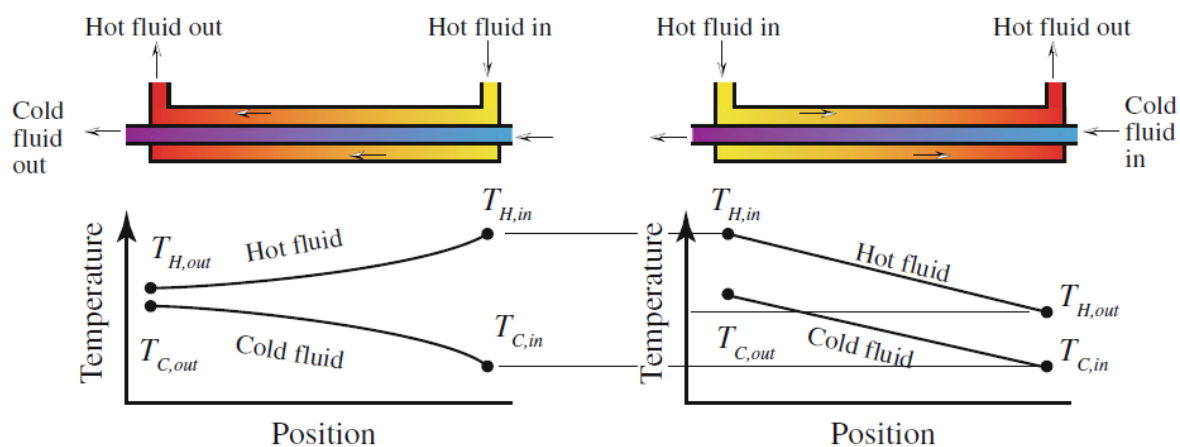


Figure 19 : Évolution de la température en fonction de la position dans le système dans un échangeur à co-courant (à gauche) et à contre-courant (à droite) (Mosher & Trantham, 2017).

Les échangeurs à contre-courant font circuler les deux fluides en sens inverse. De ce fait, la différence de température entre les deux fluides est maximisée en tous points du système. La différence de température entre les deux fluides reste similaire quelle que soit leur position comme le montre le graphique droit de la Figure 19. Dans ce type d'échangeur, la température de sortie du fluide froid est supérieure à celle du fluide chaud, ce qui était impossible avec un échangeur à co-courant qui permettait tout au plus d'atteindre une température d'équilibre entre les deux fluides. Cette technique permet notamment de réduire le stress thermique subi par le moût. En fonction du fluide froid utilisé, il faudra faire attention à ce que le fluide chaud qui doit être refroidi ne gèle pas (utilisation d'eau glycolée par exemple). De manière générale, un échangeur à contre-courant sera plus efficace qu'un échangeur à co-courant pour un même débit et une même surface d'échange.

Au-delà du principe de fonctionnement, il existe deux grands principes mécaniques de conception des échangeurs : les échangeurs à tubes et coquilles (de l'anglais « shell and tubes ») et les échangeurs à plaques.

Les échangeurs à tubes et coquilles ne fonctionnent en réalité d'aucune des deux manières citées précédemment. Le principe de fonctionnement d'un tel échangeur est illustré sur la Figure 20. Le fluide chaud va rentrer par l'extrémité gauche de la cuve avant d'être réparti dans les différents tubes pour ressortir à droite de celle-ci. Le fluide froid quant à lui va être injecté par le haut de la cuve, circuler au sein de celle-ci en serpentant de bas en haut jusqu'à la sortie. Ce système s'apparente à un système à co-courant.

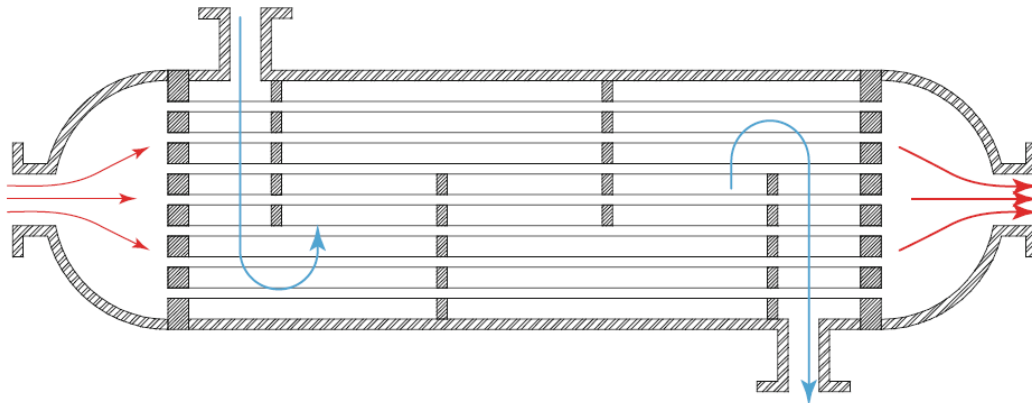


Figure 20 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à coquilles et à tubes (Mosher & Trantham, 2017).

Un autre système à mi-chemin entre le co-courant et le contre-courant existe également comme l'illustre la Figure 21. Le fluide chaud, à la place de rentrer par la gauche de la cuve et d'en ressortir par la droite, va effectuer un aller-retour. Pour ce faire, les tubes dans lesquels il circule seront raccordés par des U en bout de cuve afin que le fluide puisse revenir à droite de la cuve. Le fluide froid quant à lui va circuler de la même manière. Dans la première partie de l'échangeur (partie supérieure), les fluides chaud et froid vont circuler à co-courant, tandis que dans la partie basse, ils circuleront à contre-courant.

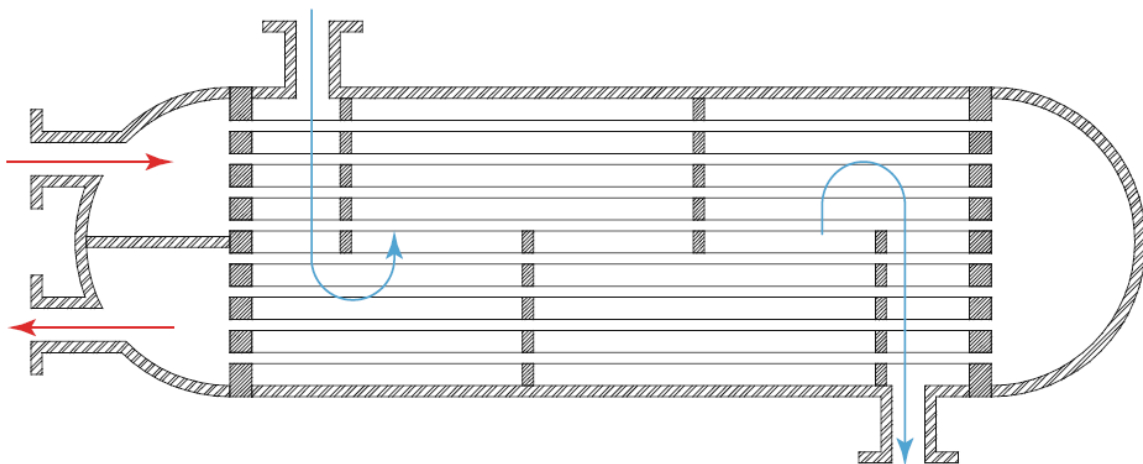


Figure 21 : Illustration du principe de fonctionnement d'un échangeur à coquilles et à tubes hybrides (Mosher & Trantham, 2017).

Les échangeurs à plaques constituent le deuxième type d'échangeurs principalement utilisés. Ils sont constitués d'une série de fines plaques (généralement entre 0.1 et 0.8 mm) disposées parallèlement et légèrement espacées entre elles (5 à 10 mm). Ces plaques présentent un gaufrage à leur surface afin d'augmenter le rendement en créant une turbulence. Leur agencement est illustré sur la Figure 22. Des joints sont placés afin de maintenir l'écartement entre les différentes plaques. Les fluides chauds et froids vont circuler en alternance entre les plaques. Le transfert de chaleur à travers ce type d'échangeur est très efficace, car la surface des plaques est grande et elles sont composées d'un matériau très fin. Grâce au système de joints, les deux fluides ne sont jamais en contact l'un avec l'autre, le transfert de chaleur a juste lieu via les différentes plaques, par convection. Ces échangeurs peuvent être réglés pour fonctionner à co-courant ou à contre-courant. Ils vont permettre de refroidir le moût d'une température de 100°C à environ 20°C avant la fermentation. Le débit restera constant pendant le passage dans l'échangeur, mais la pompe va devoir développer une grosse charge de pression pour pouvoir propulser les fluides à travers les interstices étroits entre les différentes plaques de l'échangeur.

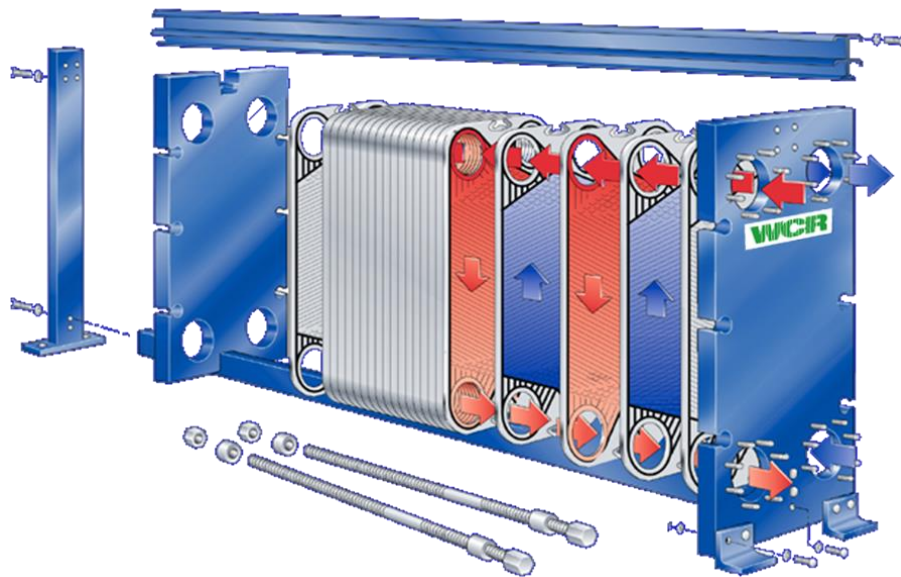


Figure 22 : Illustration du fonctionnement d'un échangeur à plaques (Fonctionnement d'un échangeur à plaques, s.d.).

Ce type d'échangeur est très pratique, car il est facile à démonter pour le nettoyer en comparaison aux échangeurs à tubes et coquilles. Du fait de leur fonctionnement simple, ils sont très fiables et ont une longue durée de vie. Enfin, ils sont très compacts, ce qui rend leur installation aisée même dans des espaces restreints. C'est pourquoi ce type d'échangeur est couramment utilisé en brasserie et sera retenu pour la suite de ce travail.

3.3.4. Récupération sur les fumées de la chaudière (économiseur de fumées)

L'ensemble de cette section est basé sur les articles de référence suivants : (Intégration des énergies renouvelables et de récupération dans l'industrie - Fiche technique Fumées de chaudières à vapeur, 2018), (Une réaction chimique : la combustion du méthane, s.d.), (Combustion et combustibles, 2007).

Afin de maximiser le rendement de la chaudière, une récupération de la chaleur fatale contenue dans les fumées provenant de la chaudière peut être mise en place. Pour ce faire, il faut installer un économiseur de fumées sur la cheminée de la chaudière. Celui-ci va agir comme un échangeur gaz-eau et permettre une économie en combustible allant jusqu'à 6%.

L'implémentation d'un tel système nécessite cependant quelques précautions. En effet, l'économiseur agissant comme un échangeur, va refroidir les fumées de combustion. Si celle-ci sont refroidies en dessous de leur point de rosée, elles risquent de condenser. Cela peut provoquer des risques de corrosion dans le cas où le combustible utilisé par la chaudière serait du mazout. Il y a, en effet, un risque de dégagement de soufre dans les fumées qui rendrait le condensat acide. C'est pourquoi l'économiseur sera placée entre la chaudière et un éventuel condenseur, la combinaison des deux permettant une économie allant de 10 à 15% en carburant. Un schéma de principe du fonctionnement d'un économiseur de fumées placé sur une chaudière vapeur peut être consulté sur la Figure 23. L'eau est alors préchauffée en refroidissant les fumées avant d'être convertie en vapeur par la chaudière. Cependant, la combinaison des deux technologies reste peu fréquente.

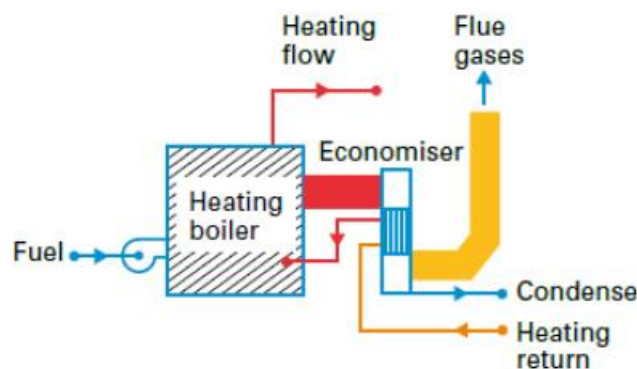


Figure 23 : Schéma de principe d'un économiseur de fumées suivi d'un condenseur sur une chaudière vapeur (Intégration des énergies renouvelables et de récupération dans l'industrie - Fiche technique Fumées de chaudières à vapeur, 2018).

L'intégration d'un économiseur sur la cheminée ne pose aucune difficulté particulière. Le brassage étant un procédé où les besoins en eau chaude sont discontinus, l'installation d'une cuve tampon devra être envisagée afin de stocker l'eau chaude produite via l'économiseur.

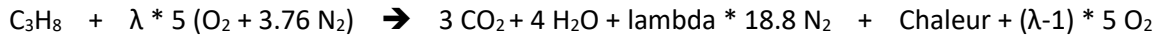
Afin d'estimer la quantité d'énergie récupérable dans les fumées de combustion de la chaudière, une analyse des fumées par un chauffagiste est nécessaire. Celle-ci va permettre de déterminer la température des fumées émises ainsi qu'un coefficient λ .

Celui-ci correspond à l'excès d'air consommé durant la combustion. Il s'agit d'un coefficient pondérateur de la quantité d'air nécessaire à une combustion parfaite du combustible. En fonction du type de combustible utilisé, cette quantité d'air va varier. Sur base des équations stœchiométriques de combustion, cette quantité d'air peut être déterminée. La réaction de combustion du propane (C_3H_8) peut être consultée dans l'Équation 6.



Équation 6 : Equation stœchiométrique de la combustion parfaite du propane (Une réaction chimique : la combustion du méthane, s.d.).

Cependant, l'oxygène utilisé pour la combustion provient de l'air atmosphérique qui est également composé d'autres éléments tels que l'azote (N) ainsi que l'eau (H_2O) et d'autres gaz en très faibles proportions. Il est courant de considérer que l'air est composé à 20% de dioxygène (O_2) et 80% de diazote (N_2) (Composition de l'air, 2020). Il y a donc 3.76 fois plus de diazote que de dioxygène dans un volume d'air. De ce fait, il est nécessaire d'ajouter beaucoup plus d'air (5 fois plus) pour satisfaire la réaction en oxygène. L'équation va alors se modifier comme le montre l'Équation 7. Ce sont donc 25.8 volumes de fumées qui sont dégagés lors de la combustion parfaite d'un volume de propane.



Équation 7 : Équation stœchiométrique pondérée de la combustion du propane avec de l'air comme comburant.

Le coefficient λ fourni dans le bulletin d'analyse des fumées va venir multiplier cette quantité d'air nécessaire à la réaction et permettre de déterminer le débit de fumées obtenu lors de la combustion. Les différentes quantités théoriques de fumées dégagées ($Q_{\text{théorique}}$) lors de la combustion des 3 types de combustibles étudiés dans ce travail sont reprises dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Quantité de fumée dégagée lors de la combustion d'un volume de carburant.

Type de combustible	Propane [l]	Mazout [l]	Gaz naturel [m³]
Quantité de fumée [m³]	25.8	10	10

Grâce aux données du Tableau 8, au coefficient λ du bulletin d'analyse des fumées et du débit en carburant ($Q_{\text{carburant}}$) déterminé à l'aide d'un débitmètre à l'entrée de la chaudière, le débit de fumées de combustion peut être déterminé via l'Équation 8.

$$Q_{\text{fumée}} = Q_{\text{théorique}} * \lambda * Q_{\text{carburant}} \text{ [m}^3\text{/h]}$$

Équation 8 : Équation permettant de déterminer le débit de fumées émis par la chaudière.

La quantité d'énergie théorique récupérable peut alors être calculée via l'Équation 9. L'énergie récupérée est théorique et ne tient pas compte du rendement de l'échangeur et des pertes inhérentes au stockage ou au transport de l'eau chaude.

$$Q = m * C_p * \Delta T \text{ [kWh]}$$

Équation 9 : Equation de la quantité d'énergie thermique transférée (Aubinet, Thermodynamique, 2014).

Où

- Q est la quantité d'énergie théoriquement récupérable [kWh] ;
- m est le volume de fumée produit en une heure [m³] ;
- C_p est la capacité thermique volumique de la fumée. Celle-ci est considérée comme étant égale à celle de l'air, soit 0.34 [W/(m³*K)] (ASHRAE Handbook, 1985) ;
- ΔT est la différence de température des fumées entre l'entrée et la sortie de l'économiseur.

Cette quantité d'énergie correspond à une augmentation de rendement d'environ 1% lorsque la température des fumées est abaissée de 22°C avec un λ de 1.2 dans le cas où le combustible utilisé est du gaz naturel ou du mazout.

Afin d'éviter que la fumée ne condense, il sera considéré que les fumées ne sont pas refroidies sous une température de 130°C.

Dans le cas où un condenseur serait également envisagé, son implémentation ainsi que celle de l'économiseur devront se faire au niveau du sol, proches de la sortie des fumées de la chaudière. Cela ajoute une contrainte spatiale. Les condensats récupérés sont corrosifs et impliqueront plus de maintenance des installations. C'est pourquoi l'implémentation d'un économiseur de fumée sans condenseur a été retenue dans le cadre de ce travail. L'économiseur servira à préchauffer de l'eau utilisée lors du procédé de brassage. Ce procédé étant discontinu, elle sera stockée dans une bache d'eau chaude isolée avant d'être utilisée.

3.3.5. Production d'eau chaude à l'aide de panneaux solaires thermiques

L'ensemble de cette section est basé sur les ouvrages de référence suivants : (Capteur solaire à eau chaude, 2010), (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010), (Importance de l'orientation et des types de structures, s.d.).

3.3.5.1. Principe de fonctionnement

L'installation de panneaux solaires thermiques peut également aider à diminuer la consommation d'énergie thermique de la brasserie en préchauffant de l'eau nécessaire au procédé de brassage grâce à l'énergie solaire.

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire thermique est illustré sur la Figure 24. Les rayons solaires sont convertis en chaleur grâce à l'utilisation d'un absorbeur. Il s'agit d'un corps de couleur noire présentant des propriétés d'absorption élevées et une émissivité très faible. C'est via cet absorbeur que l'énergie solaire sera transférée à un fluide caloporteur. Celui-ci est généralement composé d'eau glycolée (de l'eau mélangée à du propylène glycol), notamment pour éviter qu'il ne gèle durant la saison hivernale. Celui-ci va circuler jusqu'au ballon de stockage dans lequel il va libérer la chaleur accumulée au travers d'un échangeur thermique. L'eau contenue dans le ballon pourra subir une chauffe d'appoint à l'aide d'une chaudière afin d'être utilisée pour le brassage ou pour la production de vapeur.

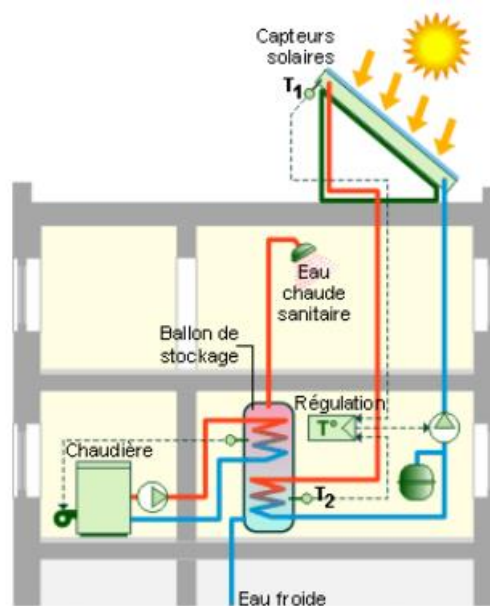


Figure 24 : Schéma de principe du fonctionnement d'une installation solaire thermique avec une chaudière d'appoint (Capteur solaire à eau chaude, 2010).

L'installation représentée sur la Figure 24 est un système en boucle fermée. C'est-à-dire que le fluide circulant dans les panneaux est différent de celui utilisé pour le process. L'énergie thermique étant transmise d'un fluide à l'autre via un échangeur. Ce système est le plus répandu en Belgique par rapport aux systèmes en boucle ouverte (l'eau alimentaire circule directement dans les panneaux) à cause de problèmes liés au gel durant l'hiver.

Les systèmes utilisés en Belgique fonctionnent suivant un principe de circulation forcée. Deux sondes de températures sont placées sur le circuit (T_1 et T_2). Lorsqu'une différence de température suffisante apparaît entre les deux ($T_1 > T_2$), des circulateurs se mettent en marche afin de faire circuler le fluide caloporteur. Les systèmes à circulation forcée peuvent être classés en différentes catégories en fonction du débit de fluide. Certaines installations de type « high flow » vont proposer un débit de

fluide élevé, mais avec un ΔT faible entre l'entrée et la sortie du panneau. À l'opposé, d'autres systèmes « low flow » présenteront un débit faible pour une forte différence de température. D'autres systèmes « mix flow » permettront d'ajuster le débit pour garder un ΔT fixe en évitant d'arrêter/redémarrer la pompe trop fréquemment. Le système est généralement placé sous pression, une pression d'1 bar étant appliquée à l'arrêt du système et de 6 bars en fonctionnement.

3.3.5.2. Types de capteurs

3.3.5.2.1. Capteurs plans

Il existe deux types de capteurs plans : les capteurs plans opaques et les capteurs plans vitrés.

Les premiers sont composés d'un ensemble de tuyaux foncés opaques qui permettent d'absorber l'énergie provenant du rayonnement solaire. Ils servent également de tuyauterie pour faire circuler le fluide caloporteur (souvent de l'eau dans ce cas-ci). Ils présentent l'avantage d'un coût réduit, mais leur rendement est faible. Ils fonctionnent bien dans des applications à basse température comme le chauffage des piscines par exemple.

Les seconds sont les plus fréquents et servent à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), pour un appoint de chauffage, piscine, etc. Une vue en coupe d'un capteur plan vitré est consultable sur la Figure 25. Le fluide caloporteur circule dans un réseau de tubes en forme de serpent (6). Ce réseau se trouve dans une cavité fermée par une vitre (3) opaque aux rayons infrarouges provenant de l'intérieur du panneau, ce qui a pour effet de conserver la chaleur (effet de serre) dans la cavité où est situé le serpent. Une plaque absorbante permet de maximiser la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique qui sera transportée par le fluide caloporteur (5). Une isolation thermique est placée à l'arrière et sur les côtés du panneau afin de minimiser les pertes de chaleur (4). Le tout est enfermé dans un boîtier (1) qui est étanchéifié par des joints (2) pour empêcher l'eau d'endommager les composants en cas de pluie.

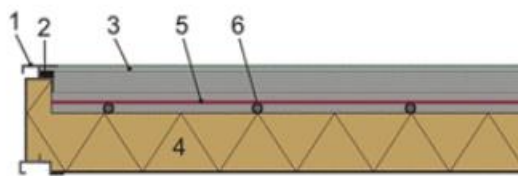


Figure 25 : Vue en coupe d'un capteur plan vitré (Capteur solaire à eau chaude, 2010).

3.3.5.2.2. Capteurs à tubes sous vide

La principale caractéristique de ces capteurs est que leur isolation est assurée par le vide. Ils ont une forme cylindrique, un diamètre d'une dizaine de centimètres pour une longueur de 2 mètres. Leur rendement lors de la production d'eau chaude d'égale température à celle de l'ambiance est inférieur aux capteurs plans, mais leur coefficient d'isolation thermique est meilleur. De ce fait, la récupération d'énergie à basse température est inférieure aux capteurs plans. Ils restent cependant meilleurs à haute température, c'est pourquoi ils sont utilisés comme moyen de chauffage ou pour certains autres procédés. Une vue en coupe d'un tel capteur est visible sur la Figure 26. L'absorbeur (2) est posé sur un support en cuivre. Des tubes évacuant la chaleur (généralement en cuivre) sont soit juxtaposés, soit concentriques (3). Le système est entouré d'un tube en verre (1) dans lequel le vide d'air est effectué. Enfin, un support permet la rotation des tubes (4).

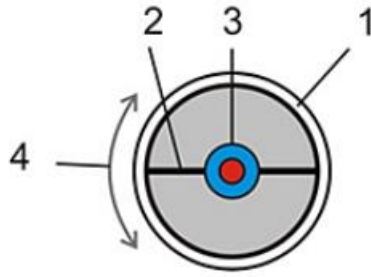


Figure 26 : Vue en coupe d'un capteur solaire à tubes sous vide avec absorbeur sur ailette en cuivre (Capteur solaire à eau chaude, 2010).

Ce type de capteur présente deux grandes familles :

- Les tubes sous vide avec absorbeur sur ailette en cuivre
- Les tubes sous vide avec absorbeur sur ailette en verre

Les capteurs avec absorbeur sur ailette en cuivre présentent un rendement optique plus élevé dû à une meilleure sélectivité du matériau. Pour rappel, le rendement optique est le rendement maximal d'un capteur lorsque la température ambiante et celle du fluide sont égales (il n'y a donc pas de pertes thermiques). Le plus gros avantage est que l'absorbeur peut être orienté différemment de son support, permettant une installation en façade par exemple.

3.3.5.3. Rendement

Pour rappel, le rendement d'un capteur est schématisé sur la Figure 28 et est caractérisé par le rapport entre le rayonnement solaire incident (E_0) et la chaleur utile (Q_3). Celle-ci peut être calculée via l'équation suivante :

$$Q_3 = E_0 - E_1 - Q_2 - Q_1 \text{ [MJ]}$$

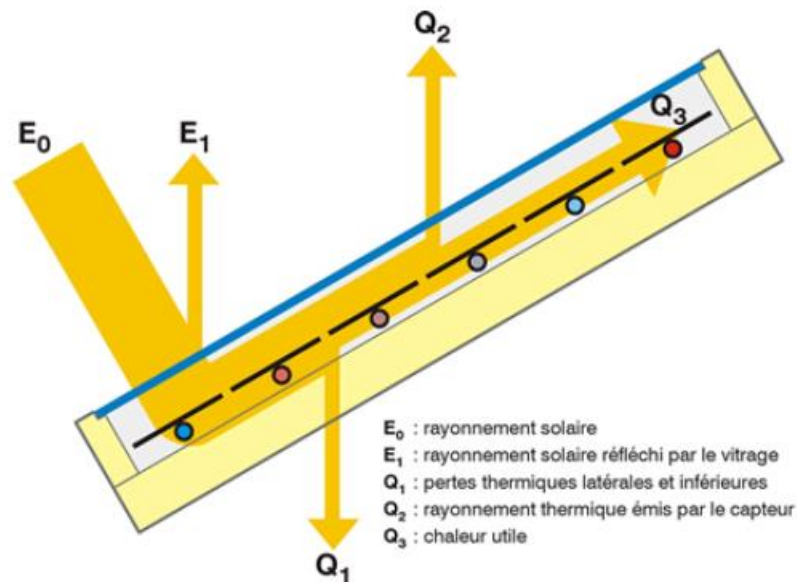


Figure 27 : Illustration du rendement d'un panneau solaire thermique (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010).

Le rendement des 4 types de capteurs étudiés est illustré sur la Figure 28. La chute de rendement dès que la différence de température augmente est visible sur la courbe bleue pour les capteurs plan non

vitrés. Les capteurs plans vitrés en revanche ont un rendement supérieur à 50% jusqu'à une différence de température d'environ 70°C. Enfin, le capteur sous vide avec absorbeur sur cuivre est le capteur présentant le plus haut rendement jusqu'à une différence de température de 190°C.

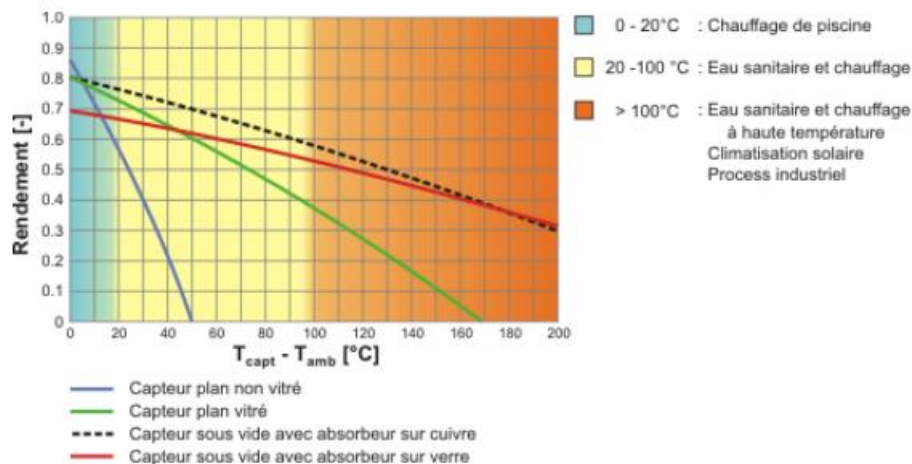


Figure 28 : Evolution du rendement en fonction de la température de différents types de capteurs solaires thermiques (Capteur solaire à eau chaude, 2010).

Le rendement de l'installation est également impacté par d'autres facteurs comme la longueur et la section de la tuyauterie entre les capteurs et le ballon de stockage ainsi que par leur isolation. Le rendement moyen d'une installation est d'environ 30% à 40%. En Belgique, l'irradiation moyenne est d'environ 1000 kWh/m².an, 300 à 400 kWh/m².an seront donc captés, ce qui correspond à environ 30 à 40 litres de mazout annuels.

3.3.5.4. Fraction solaire

La fraction solaire correspond à la proportion d'eau chaude nécessaire au procédé brassicole qui est destinée à être produite par l'installation solaire thermique. Son impact est important sur le rendement annuel des panneaux.

La surface de panneaux nécessaire pour produire la quantité d'eau chaude désirée durant les jours de faible luminosité sera bien supérieure à la surface nécessaire durant les journées chaudes d'été. Si l'installation est dimensionnée pour les journées où la luminosité est médiocre, elle sera surdimensionnée le reste du temps. En effet, les panneaux produiront la quantité d'eau chaude désirée plus rapidement et ne fonctionneront plus le reste du temps. La variation du taux d'utilisation en fonction de la fraction solaire est visible sur la Figure 29.

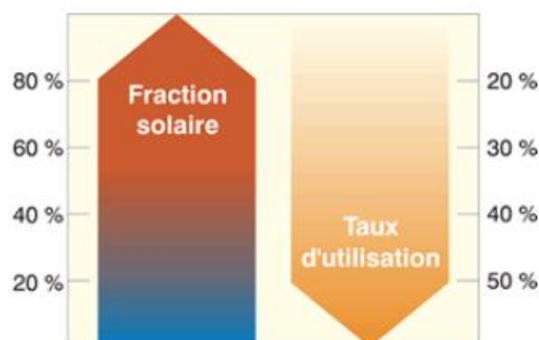


Figure 29 : Variation du taux d'utilisation de l'installation solaire thermique en fonction de la fraction solaire (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010).

Plus la fraction solaire augmente, plus le taux d'utilisation diminue si l'installation est dimensionnée pour les jours couverts. Cela va également provoquer des pertes thermiques ainsi qu'un taux de fonctionnement à haute température plus fréquent induisant une diminution de la production surfacique [kWh/m²]. La relation entre la surface de panneaux installée, la fraction solaire et le rendement est illustrée par la Figure 30. Celle-ci n'est pas linéaire et suit une asymptote horizontale. Plus la surface de panneaux augmente (et donc la fraction solaire), plus le rendement va diminuer, rendant de plus en plus faible la production au m².

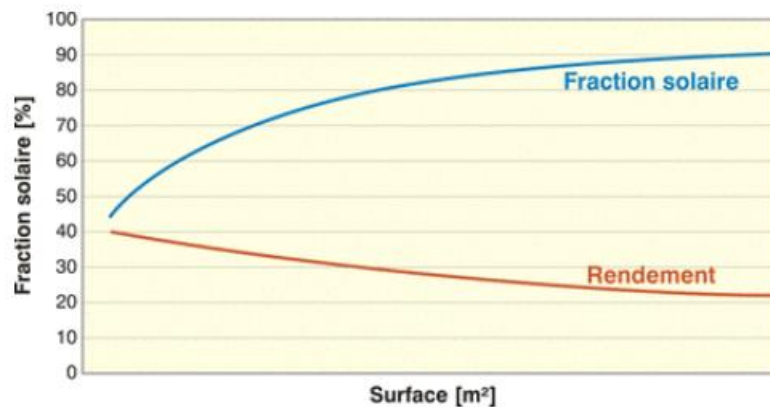


Figure 30 : Relation entre la superficie de panneaux installée, la fraction solaire et le rendement d'une installation solaire thermique (Rendement d'une installation solaire thermique, 2010).

3.3.5.5. Inclinaison et orientation des capteurs

La quantité d'énergie reçue par un capteur solaire sera d'autant plus importante que les rayons du soleil sont perpendiculaires au capteur. En effet, une surface perpendiculaire au rayonnement solaire capte plus d'énergie qu'une surface ayant une autre inclinaison par rapport à ceux-ci. La hauteur du soleil dans le ciel variant au fil des saisons, l'inclinaison devra donc être choisie judicieusement afin d'optimiser les apports solaires tout au long de l'année. L'évolution annuelle de l'inclinaison optimale d'une installation solaire à Philippeville est visible sur la Figure 31. L'inclinaison doit être forte durant l'hiver (60° par rapport à l'horizontale) et relativement faible en été (un peu plus de 10° par rapport à l'horizontale).

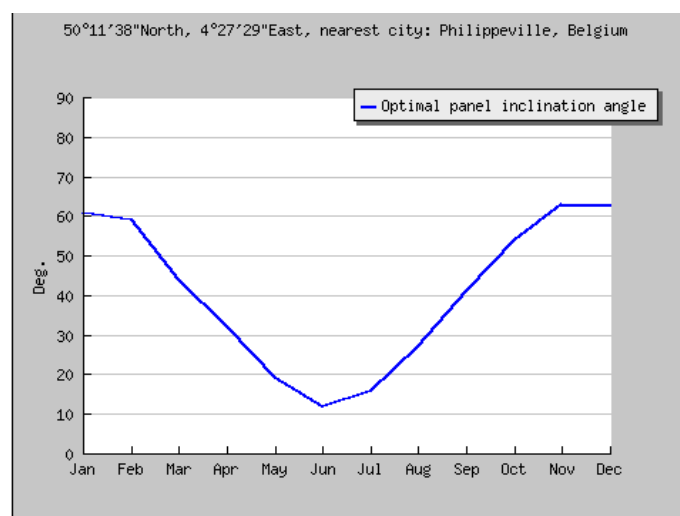


Figure 31 : Evolution annuelle de l'angle d'inclinaison optimal de panneaux solaires à Philippeville (Importance de l'orientation et des types de structures, s.d.).

Une orientation sud ou proche de celui-ci sera préférée afin de capter un maximum de rayons solaires durant la journée.

En fonction de l'orientation et de l'inclinaison par rapport à l'horizontale des panneaux, un facteur correctif va être appliqué au rendement de l'installation. Ce facteur correctif est consultable dans le Tableau 9.

© www.ef4.be		inclinaison par rapport à l'horizontale (°)						
		0	15	25	35	50	70	90
orientation	est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	sud	88%	96%	99%	max 100%	98%	87%	68%
	sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

Tableau 9 : Facteurs correctifs à appliquer au rendement d'une installation solaire thermique en fonction de son orientation et de son inclinaison par rapport à l'horizontale (Importance de l'orientation et des types de structures, s.d.).

Dans le cadre de cette étude, le choix se porte sur des capteurs plans, car ils présentent le meilleur rapport entre leur efficacité et leur prix. Ces capteurs fonctionnent en boucle fermée afin d'éviter les problèmes liés au gel en hiver. Ils fonctionnent selon un principe de circulation forcée de type « mix flow » qui adapte le débit en fonction de la température souhaitée. De plus, ils semblent être les plus adaptés au climat rencontré en Belgique. Enfin, ils sont bien adaptés pour les régimes de moyenne température (ΔT de 20 à 100°C).

La fraction solaire retenue est de 40% afin d'obtenir un rendement maximal des installations, soit un rendement estimé de 45% et donc environ 450 kWh/m².an de panneau.

4. Matériel et méthode

4.1. Introduction

Cette section a pour but de décrire les différentes hypothèses ainsi que les méthodes de calcul utilisées afin de déterminer le temps de retour sur investissement de 2 technologies de récupération d'énergie thermique. Ce temps de retour est également déterminé pour une installation de panneaux solaires thermiques.

Pour ce faire, différents paramètres de base doivent être définis tels que le type de carburant utilisé, le rendement de la chaudière et sa consommation annuelle ou encore le volume brassé annuellement. Ces différentes données permettront d'établir la consommation annuelle de la brasserie et serviront de base pour quantifier l'économie d'énergie apportée par les 3 outils étudiés. Le résultat obtenu est présenté sous forme d'un temps de retour sur investissement, permettant d'évaluer la pertinence des investissements envisagés.

Ce chapitre débutera avec les différents choix financiers effectués afin d'affiner le temps de retour sur investissement tels que la déduction fiscale, le taux d'inflation de l'énergie, le taux d'actualisation ou encore les primes éventuelles à l'investissement. Ensuite, les différentes technologies étudiées seront détaillées dans l'ordre suivant : la mise en place d'un économiseur sur les fumées de la chaudière, l'installation d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition et la production d'eau chaude à l'aide de panneaux solaires thermiques.

Enfin, une normalisation par rapport au prix actuel est effectuée. Celle-ci a pour but de calculer un temps de retour indépendamment du prix du carburant choisi. Elle permet de déterminer les temps de retour les plus extrêmes par rapport au prix actuel du carburant.

4.2. Choix financiers

Lors du calcul du temps de retour des différents investissements considérés dans ce travail, des hypothèses économiques ont été posées. Les choix effectués sont les suivants :

- **Déduction fiscale** : 13,5%. Cela correspond à la déduction maximale pour les sociétés réalisant des investissements économiseurs d'énergie (Déduction pour investissement, s.d.) ;
- **Taux d'inflation de l'énergie** : 1%. Cela correspond à l'inflation moyenne des 5 dernières années d'après la banque centrale européenne⁵ ;
- **Taux d'actualisation** : 4%. Ce taux a été choisi de façon à couvrir une légère prise de risque prise par l'entreprise lors de l'investissement. Celle-ci est majorée au taux d'intérêt dont aurait bénéficié l'entreprise en plaçant son argent en banque ;
- **Les primes** : le montant des primes et leur méthode de calcul seront détaillés dans les sections consacrées aux différents outils.

Ces choix sont fixes et ont été utilisés pour l'ensemble des simulations réalisées dans le cadre de ce travail.

Les gains annuels sont actualisés chaque année via l'Équation 4 afin de tenir compte de l'évolution du coût de l'énergie. Le cashflow est utilisé pour désigner les flux de trésorerie. Chaque année, le cashflow correspond à la différence entre les dépenses et les recettes. Dans le cadre de ce travail, les coûts d'investissement ont été assignés comme une dépense à l'année 0. Ensuite les bénéfices annuels provenant des différents outils de récupération énergétique correspondent au cashflow.

⁵ https://sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=122.ICP.M.U2.N.000000.3.ANR

Le cashflow cumulé reprend l'investissement (négatif) auquel les gains actualisés sont sommés. Enfin, le cashflow est actualisé via l'Équation 3 et sommé au cashflow cumulé actualisé de l'année précédente. Un graphique représentant l'évolution du cashflow cumulé actualisé est alors dressé pour chacune des technologies étudiées.

Un temps de retour simple (**TRS**) est également calculé pour chaque technologie étudiée via l'équation suivante :

$$TRS = \frac{Coût_{invest}}{\left(\frac{1}{10} * \sum_{n=1}^{10} Gain\right)}$$

Où

- **TRS** est le temps de retour simple [Années] ;
- **Coût_{invest}** est le coût de l'investissement net [€] ;
- **n** est l'année considérée ;
- **Gain** est le gain annuel de l'année considérée [€].

Les différents temps de retour sont calculés en années et sont donc arrondis à l'unité.

Pour chacun des outils analysés, le cours des différents carburants en date du 18 juillet 2020 a été utilisé. Ce cours est consultable dans le Tableau 12. Les gains considérés sont calculés par rapport à une chaudière ayant un rendement de 89%.

4.3. Outils analysés

4.3.1. Chaudière

Le dimensionnement d'une chaudière nécessite une connaissance approfondie de la brasserie étudiée. Pour ce faire, les différents postes consommateurs de vapeur provenant de la chaudière doivent être connus tels que le système de chauffage, la chambre chaude, les besoins pour l'empâtage et l'ébullition, etc.

Ce travail se voulant le plus généraliste possible sans avoir recours à une multitude de données, il est dès lors impossible de dimensionner une chaudière de manière précise.

De plus, l'implémentation d'une nouvelle chaudière au sein d'une entreprise est un travail complexe nécessitant une étude approfondie des différents aménagements à réaliser. Il existe une grande variabilité dans les différents équipements que nécessite une chaudière vapeur ainsi que sur le *piping*. Ceci implique une variabilité importante des coûts d'installation.

Enfin, les coûts liés à l'achat d'une nouvelle chaudière sont difficilement quantifiables. En effet, il existe une fluctuation importante des prix d'une marque à l'autre à puissance de chaudière égale.

La variabilité du coût d'installation ainsi que du prix d'achat induit une grande incertitude lors de la détermination du temps de retour sur investissement.

C'est pourquoi l'étude du temps de retour de l'installation d'une nouvelle chaudière n'a pas été pris en compte dans le cadre de ce travail. L'incertitude décrite précédemment ne permettant pas d'atteindre un niveau de précision satisfaisant lors du calcul du temps de retour.

4.3.2. Économiseur sur les fumées de la chaudière

Afin de pouvoir estimer la quantité de fumée produite ainsi que la puissance de l'économiseur, différentes données doivent connues :

- La température des fumées de la chaudière, fixée à 200°C ;
- Le temps de fonctionnement de la chaudière, fixé à 1000 heures/an ;
- Le facteur de charge, fixé à 40% ;
- Le taux d'évaporation durant l'ébullition, fixé à 10% ;
- La capacité d'un brassin [HL].

Dans un premier temps, la puissance de la chaudière est calculée. Ce dimensionnement se base sur le raisonnement suivant : l'ébullition est l'étape la plus énergivore du processus brassicole. La chaudière doit être assez puissante pour pouvoir réaliser l'ébullition (montée en température du moût de 75°C à 100°C (soit un ΔT de 25°C) et de compenser les pertes calorifiques liées à l'évaporation) en une heure. La chaudière est donc surdimensionnée, car l'ébullition dure généralement plus d'une heure.

L'hypothèse qu'aucune étape du processus brassicole ne se chevauche est faite pour ce dimensionnement.

Pour déterminer la quantité de vapeur nécessaire à l'ébullition, il faut d'abord calculer l'énergie requise pour chauffer le brassin de 25°C via l'Équation 1. Les pertes calorifiques liées à l'évaporation seront quant à elles déterminées via l'Équation 2 où m_{evap} sera déterminé en multipliant la taille du brassin par le taux d'évaporation. La somme des résultats de ces deux équations correspond à la puissance théorique nécessaire de la chaudière ($P_{théorique}$). La conversion de la puissance théorique en puissance réelle ($P_{réelle}$) est effectuée via l'équation suivante :

$$P_{réelle} = \frac{P_{théorique}}{\eta_{chaudière}} [\text{kW}]$$

Où

- $\eta_{chaudière}$ est le rendement de la chaudière, fixé à 89% dans cette étude.

La puissance réelle de la chaudière peut être convertie en kg de vapeur, unité couramment utilisée, via l'équation suivante :

$$Q_{vapeur} = \frac{P_{réelle}}{Cp_{vapeur}} [\text{kg}]$$

Le coût de l'économiseur de fumée est déterminé en fonction de la puissance de la chaudière. Un récapitulatif des coûts peut être consulté dans le Tableau 10. Un coût est alors automatiquement assigné à l'économiseur en fonction de la puissance de la chaudière.

Tableau 10 : Variation du coût d'un économiseur posé en fonction de la puissance de la chaudière (EDF).

Puissance [kW]	Coût de l'économiseur posé [€]
1000	20.000 €
2000	20.000 €
4536	21.200 €
7560	23.200 €
11340	30.400 €
15120	38.600 €
18900	40.000 €

Une diminution de consommation de carburant de 1% est obtenue par réduction de 22°C des fumées de combustion (EDF). La diminution de la consommation en carburant est donc calculée via l'équation suivante :

$$Eco = \frac{T_{in} - T_{out}}{22} [\%]$$

Où

- **Eco** est la diminution de la consommation en carburant [%] ;
- **T_{in}** est la température des fumées à la sortie de la chaudière, fixée à 200°C ;
- **T_{out}** est la température des fumées à la sortie de l'économiseur, fixée à 130°C pour éviter tout risque de condensation, ce qui aurait des conséquences néfastes notamment dans le cas d'une chaudière mazout.

Pour quantifier l'énergie économisée annuellement, il est nécessaire de connaître la production annuelle de la chaudière. En considérant 2 brassins par semaine, 50 semaines par an (soit 100 brassins), le temps de fonctionnement de la chaudière est estimé à 1000 heures par an avec un facteur de charge de 40%. Il est dès lors possible de calculer l'énergie annuelle produite par la chaudière via l'équation suivante :

$$Q_{tot} = P_{réelle} * T_{fonctionnement} * Facteur_{charge} * \eta_{économiseur} \text{ [kWh]}$$

Où

- **Q_{tot}** est l'énergie annuelle produite par la chaudière [kWh] ;
- **T_{fonctionnement}** est le temps de fonctionnement, fixé à 1000 heures par an ;
- **Facteur_{charge}** est le facteur de charge de la chaudière, fixé à 40% ;
- **η_{économiseur}** est le rendement de l'économiseur, fixé à 95%.

L'économie en énergie annuelle (**Eco_{annuelle}**) est alors quantifiable via l'équation suivante :

$$Eco_{annuelle} = Eco * Q_{tot} \text{ [kWh]}$$

Cette économie est ensuite traduite monétairement grâce à l'équation suivante :

$$Gain_{annuel} = \left(\frac{Eco_{annuelle}}{Pouvoir_{calorifique} * \eta_{chaudière}} \right) * Prix_{carburant} \text{ [€]}$$

Où

- **Pouvoir_{calorifique}** est le pouvoir calorifique inférieur du carburant considéré [kWh/litre] pour le mazout et le propane [kWh/m³] pour le gaz naturel. Le pouvoir calorifique des différents carburants est repris dans le Tableau 11 ;
- **Prix_{carburant}** est le prix actuel du carburant [€/l] pour le propane et le mazout [€/m³] pour le gaz naturel.

Tableau 11 : Récapitulatif du pouvoir calorifique des différents types de carburants étudiés (Tableau de bord, consommation de combustibles, 2007).

Type de carburant	Unité	Pouvoir calorifique inférieur (PCI) [kWh]
Mazout de chauffage	l	9,95
Propane	l	6,59
Gaz naturel	m ³	10,12

Des primes peuvent être obtenues pour l'installation de tout système de récupération de chaleur dans les fumées des chaudières et générateurs de vapeur. La récupération doit notamment être effectuée à l'aide de récupérateurs spécifiques indépendants placés à la sortie des chaudières sur le circuit des fumées. Un montant de 50 €/kW récupéré est octroyé, plafonné à 50% de la facture et ne pouvant excéder 12 500 €. Seules les chaudières fonctionnant au gaz naturel possédant la marque CE Belgique sont concernées (Arrêté ministériel relatif aux modalités et à la procédure d'octroi des primes visant à favoriser l'utilisation rationnelle de l'énergie, 2010).

Dans le cadre de ce travail, aucune prime n'a été prise en compte pour l'installation d'un économiseur sur les fumées de la chaudière.

Différentes simulations ont été effectuées en faisant varier le coût du carburant. Trois simulations ont été faites en utilisant le cours le plus bas, le cours le plus haut et le cours actuel (au 18/07/2020) des trois carburants étudiés sur les 10 dernières années. Ils peuvent être consultés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Cours les plus hauts/bas et actuels des 3 types de combustibles étudiés au cours des 10 dernières années (Bombeck, 2020).

Type de combustible	Cours le plus haut	Cours le plus bas	Cours actuel (18/07/2020)
Mazout [€/L]	0,8756	0,3582	0,4577
Propane [€/L]	0,6722	0,3163	0,3881
Gaz naturel [€/m ³]	0,7691	0,4858	0,3

4.3.3. Condensation des vapeurs d'ébullition

Afin de pouvoir estimer la quantité de vapeur produite (et donc condensable) ainsi que la puissance de l'échangeur, différentes données doivent connues :

- La capacité d'un brassin [HL] ;
- Le nombre de brassins réalisés annuellement [brassins/an] ;
- Le taux d'évaporation durant l'évaporation [%] ;
- La durée de l'ébullition [minutes].

Afin de quantifier le gain économique, il est également nécessaire de connaître le type de combustible utilisé par la brasserie, son cours actuel ainsi que le rendement de la chaudière.

L'énergie récupérée par brassin est quantifiée à l'aide de l'équation suivante :

$$Q = \frac{V}{100} * T_{evap} * Cp_{vapeur} * \eta \text{ [kWh]}$$

Où

- **Q** est la quantité de chaleur théoriquement récupérable [kWh] ;
- **V** est le volume d'un brassin [HL] ;
- **T_{evap}** est le taux d'évaporation durant l'ébullition, fixé à 10% ;
- **Cp_{vapeur}** est la chaleur de condensation pour faire passer la vapeur à l'état liquide [kWh/kg], soit 2258 kJ/kg ou 0.63 kWh/kg (Chaleur sensible et chaleur latente, 2007) ;
- **η** est le rendement de l'échangeur, fixé à 95%.

Seule l'énergie récupérée en condensant la vapeur est considérée via cette équation. Le refroidissement des condensats n'est quant à lui pas pris en compte, le condensat étant éliminé une fois la vapeur condensée. L'économie annuelle est alors calculée en multipliant **Q** par le nombre de brassins/an.

La puissance de l'échangeur peut alors être calculée via l'équation suivante :

$$P = \frac{Q}{t} \text{ [kW]}$$

Où

- **P** est la puissance de l'échangeur [kW] ;
- **Q** est la quantité de chaleur théoriquement récupérable [kWh] ;
- **t** est la durée l'ébullition [heures].

Un coût est alors assigné à l'échangeur en fonction de sa puissance. Les coûts des différents échangeurs proviennent du catalogue de la société eau & vapeur⁶ et sont consultables dans le Tableau 13. Ce coût est majoré de 50% afin d'estimer les coûts d'installation. La somme de ces deux données représente l'investissement brut. Aucune prime n'a été prise en compte pour le placement d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition.

Tableau 13 : Variation du coût d'un échangeur sur les vapeurs d'ébullition en fonction de sa puissance⁶.

Puissance [kW]	Coût de l'échangeur [€]
140	3.012 €
220	4.330 €
360	5.528 €
620	7.089 €
830	8.498 €
950	12.341 €
1350	14.593 €
1750	17.724 €
2300	21.221 €

⁶ https://www.eau-vapeur.fr/sites/eau-vapeur/files/document/gamme/catalogue_eauetvapeur.pdf

4.3.4. Production d'eau chaude à l'aide de panneaux solaires thermiques

Afin de pouvoir dimensionner l'installation solaire thermique, différentes données sont nécessaires :

- La température de l'eau préchauffée par les panneaux solaires thermiques est fixée à 50°C dans le cadre de cette étude, un volume d'eau préchauffé à température plus faible étant préféré à un volume moindre à une température plus élevée. De plus, le procédé brassicole étant discontinu, le préchauffage à des températures plus élevées induit une déperdition thermique plus importante dans le ballon de stockage. Cela augmenterait également les pertes au niveau des panneaux ;
- La fraction solaire souhaitée est fixée à 40% afin de maximiser le rendement de l'installation, ce qui correspond à la fraction solaire maximale conseillée pour de grandes installations de production d'eau chaude sanitaire (Prédimensionner l'installation d'ECS, 2010) ;
- La distance entre les panneaux et le ballon de stockage est fixée à 30 mètres ;
- L'orientation des panneaux : une orientation sud a été choisie, celle-ci étant optimale pour capter un maximum de rayonnement solaire ;
- L'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale est fixée à 35°, ce qui est l'inclinaison optimale en Belgique.

Ces deux derniers paramètres vont influencer le rendement de l'installation. Au plus l'inclinaison et/ou l'orientation des panneaux vont s'éloigner de l'optimum, plus le facteur correctif (**facteur_{correctif}**) du rendement sera faible ce qui va faire chuter le rendement (**$\eta_{panneaux}$**) de l'installation comme le montre le Tableau 9.

Afin de dimensionner la surface de panneaux à installer, il est au préalable nécessaire de déterminer les besoins en eau chaude (**Besoins_{EC}**, [m³/an]) de la brasserie. Les besoins inhérents au brassage sont calculés en multipliant la capacité d'un brassin par le nombre de brassins réalisés annuellement. Ces besoins ont été doublés afin de couvrir les besoins en eau chaude pour le nettoyage des installations ainsi que l'eau nécessaire à une éventuelle laveuse de bouteilles. L'énergie nécessaire pour chauffer cette quantité d'eau de 15°C à 50°C (**$\Delta T = 35^\circ C$**) est estimée via l'équation suivante :

$$Q_{EC} = Besoins_{EC} * \Delta T * C_{p_{eau}} \text{ [kWh/an]}$$

Où

- **Q_{EC}** est la quantité d'énergie annuelle [kWh/an] nécessaire pour préchauffer les besoins en eau chaude de 35°C.
- **$C_{p_{eau}}$** est la chaleur volumique de l'eau soit $1.16 \frac{kWh}{K.m^3}$.

L'énergie qui sera produite par l'installation est ensuite calculée via l'équation suivante :

$$Q_{prod} = Q_{EC} * F_{solaire} \text{ [kWh/an]}$$

Cette économie est ensuite traduite monétairement grâce à l'équation suivante :

$$Gain_{annuel} = \left(\frac{Q_{prod}}{Pouvoir_{calorifique} * \eta_{chaudiere}} \right) * Prix_{carburant} \text{ [€]}$$

Le dimensionnement de l'installation est réalisé via l'équation suivante :

$$Surface = \frac{Q_{prod}}{\eta_{panneaux} * facteur_{correctif}} \text{ [m}^2\text{]}$$

Où

- **Surface** est la surface de panneaux solaires thermiques à installer [m^2] ;
- η_{panneaux} est le rendement des panneaux solaires, fixé à $450 \frac{kWh}{m^2.an}$ (Prédimensionner l'installation d'ECS, 2010).

Le coût de l'installation est établi suivant les hypothèses suivantes :

- Le coût d'un panneau s'élève à 650€/m² (Senden G. , 2020) ;
- Les frais d'installation s'élèvent à 20% du coût des panneaux ;
- Les frais inhérents à la tuyauterie s'élèvent à 100€/m (Senden G. , 2020).

La somme de ces différents coûts représente l'investissement brut. Une prime peut être obtenue lors de l'installation de panneaux solaires thermiques. Celle-ci s'élève à 2500 € pour une installation comprise entre 2 et 4m² et 200€ additionnels peuvent être obtenus pour chaque m² supplémentaire de capteurs. Le plafond de cette prime est de 6000€ et 50% du montant de la facture HTVA. (Prime pour l'installation d'un chauffe-eau solaire (prime Soltherm-ancien régime), 2019). Celle-ci sera déduite de l'investissement brut en plus de l'éventuelle déduction fiscale, pour donner l'investissement net.

4.4. Étude de la brasserie BeerFac

Une étude de la brasserie BeerFac est réalisée. Pour ce faire, les temps de retour des 2 outils de récupération d'énergie ainsi que l'installation de panneaux solaires thermiques seront analysés.

Les spécifications suivantes ont été retenues pour le calcul des différents temps de retours :

- Brassins de 15 hectolitres ;
- 150 brassins annuels, soit un total brassé de 2250 hectolitres ;
- Chaudière fonctionnant au gaz naturel, avec un rendement de 89% ;
- Temps de fonctionnement de la chaudière : 2000 heures avec un facteur de charge de 40% ;
- Prix du gaz naturel de 0.3 €/m³ ;
- Une température des fumées de la chaudière de 200°C ;
- Taux d'évaporation de 8% durant l'ébullition dont la durée est de 90 minutes ;
- Orientation des panneaux solaires thermiques : sud-est ;
- Inclinaison des panneaux solaires thermiques de 35° ;
- Fraction solaire de 40%.

D'un point de vue financier, une déduction fiscale de 13,5% a été appliquée à chacun des 3 investissements, un taux d'inflation de l'énergie de 1% et un taux d'actualisation de 4%.

4.5. Normalisation par rapport à la situation actuelle

Un coefficient normalisateur par rapport à la situation actuelle est calculé afin d'analyser l'effet de la variation de 2 facteurs sur le temps de retour des différents investissements. Cette normalisation est effectuée par rapport à la situation actuelle, soit :

- Le coût actuel du carburant (0,46€/l pour le mazout, 0,3885€/l pour le propane et 0,3€/m³ pour le gaz naturel).
- Un taux d'évaporation de 10%.

La situation actuelle sera mise en parallèle avec le coût minimal/maximal du carburant au cours des 10 dernières années. Ces coûts sont consultables dans le Tableau 12. Concernant le taux d'évaporation, des taux de 8% et 12% seront également appliqués et comparés avec un taux actuel de 10%.

Les différents coefficients normalisateurs sont déterminés via l'équation suivante :

$$Coef_{normalisateur} = \frac{TRI_{comparé}}{TRI_{actuel}}$$

Où

- **$TRI_{comparé}$** est le temps de retour sur investissement [Années] que l'on souhaite comparer. Soit le temps de retour avec un taux minimal/maximal d'évaporation ou le cours le plus haut/bas du carburant au cours des 10 dernières années.
- **TRI_{actuel}** est le temps de retour sur investissement [Années] de la situation actuelle, soit avec un taux d'évaporation de 10% ou au cours actuel du carburant.

Ces coefficients ont été calculés pour les 3 types de carburants étudiés et les 8 tailles de brassin. Ce travail a été fait pour les prix les plus hauts/bas de chacun des carburants au cours des 10 dernières années. Ils ont également été calculés pour un taux d'évaporation de 8% et 12%.

5. Résultats et discussion

5.1. Introduction

Avant d'aborder les résultats des différents outils analysés, il est important de rappeler que les temps de retour de ces différents investissements ne tiennent pas compte de l'installation d'un éventuel ballon de stockage destiné à recevoir l'eau chaude produite. Les coûts liés à l'achat et à l'installation de celui-ci sont non négligeables et peuvent avoir un impact significatif sur le temps de retour simple. De plus, diverses contingences peuvent s'ajouter aux prix calculés comme des difficultés d'intégrer les moyens de récupération au sein de l'usine, d'éventuels locaux à rénover, de la tuyauterie, etc. Ces temps de retour sont exprimés en années et arrondis à l'unité.

Le gain énergétique calculé reste théorique, car il ne prend pas en compte les pertes énergétiques liées au transport de l'eau chaude jusqu'au ballon de stockage ni les déperditions thermiques au sein de celui-ci. Les déperditions par la tuyauterie peuvent être importantes et seront influencées par la différence de température entre le fluide qui y circule et l'air environnant ainsi que par le diamètre des tuyaux. Les déperditions sont alors exprimées en Watts par mètre de tuyauterie (Pertes de chaleur des conduites et vannes non isolées, 2007). Le processus brassicole étant discontinu, ces pertes peuvent être significatives en fonction du délai entre deux brassins ainsi que de l'isolation du ballon. Une étude plus approfondie est donc nécessaire afin d'affiner le temps de retour de manière précise.

Dans un premier temps, les résultats seront présentés sous la forme d'une étude graphique de l'évolution du cashflow cumulé actualisé des 3 investissements appliqués au cas de BeerFac.

Ensuite, une étude de sensibilité au volume brassé sera effectuée sur les 3 technologies étudiées. Cette étude de sensibilité sera effectuée en faisant varier différents paramètres comme le taux d'évaporation ou le coût du carburant.

Enfin, une normalisation par rapport à la situation actuelle est calculée. Celle-ci permettra de déterminer l'évolution du temps de retour par rapport à certains paramètres fixés dans le cadre de cette étude comme le coût du carburant, le taux d'évaporation durant l'ébullition ou le type de carburant utilisé.

5.2. Étude graphique du cas de la brasserie BeerFac

5.2.1. Économiseur sur les fumées de la chaudière

L'étude de l'évolution du cashflow cumulé actualisé de l'implémentation d'un économiseur sur les fumées de la chaudière de la brasserie BeerFac est visible sur la Figure 32.

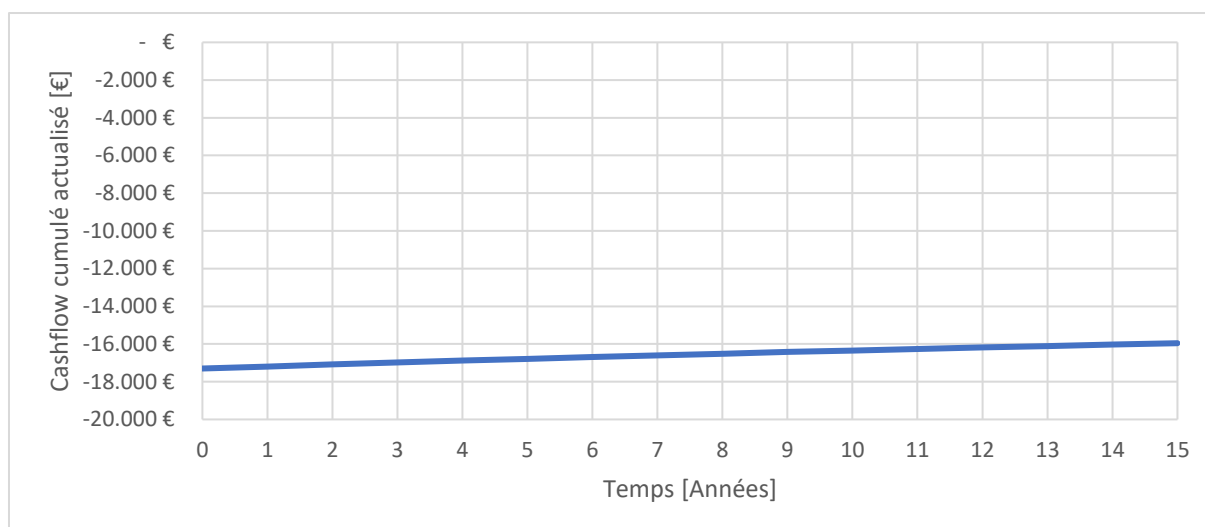


Figure 32 : Évolution du cashflow cumulé actualisé lors de l'investissement dans un économiseur de fumées sur la chaudière de la brasserie BeerFac.

Le temps de retour est supérieur à 100 ans. En effet, le placement d'un économiseur sur les fumées de la chaudière de la brasserie BeerFac apporte un gain énergétique de 112€/an alors que le coût de l'investissement brut est estimé à 20 000€. La valeur actualisée nette de cet investissement est de -16 342,06 € au bout de 10 ans. Le placement d'un économiseur de fumées n'est donc pas rentable pour la production actuelle de la brasserie.

La faible quantité d'énergie récupérée provient du fait que la fumée présente une capacité thermique volumique très faible, soit $0.34 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. Il faut dès lors un volume important de fumée à haute température pour pouvoir produire une quantité significative d'eau chaude. La brasserie BeerFac possède une chaudière de faible puissance ainsi qu'un temps d'utilisation réduit (3 brassin/semaine), ce qui ne permet pas la production d'une quantité de fumée qui justifierait l'installation d'un économiseur.

5.2.2. Condensation des vapeurs d'ébullition

La condensation des vapeurs d'ébullition permettrait une économie de 357,4€/an pour un investissement net de 3908€.

L'étude de l'évolution du cashflow cumulé actualisé de l'implémentation d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition de la brasserie BeerFac est visible sur la Figure 33.

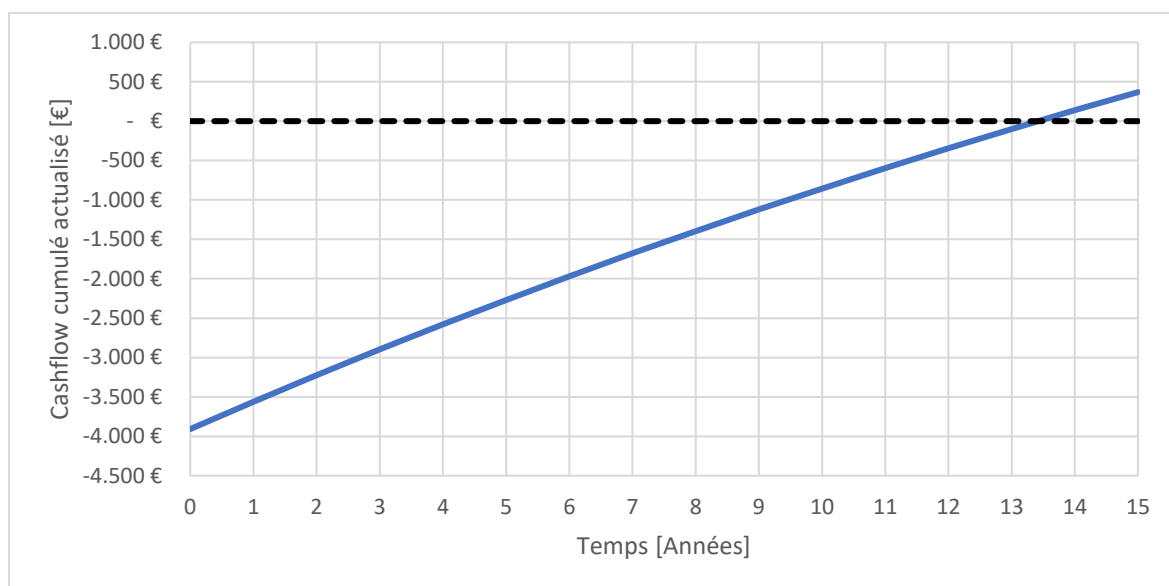


Figure 33 : Évolution du cashflow cumulé actualisé lors de l'investissement dans un condenseur sur les vapeurs d'ébullition de la brasserie BeerFac.

Le temps de retour est d'environ 13 ans soit un peu moins de 30 000 hectolitres brassés. Le temps de retour peut cependant devenir plus favorable dans le cas où le cours du carburant augmenterait ou si le taux d'évaporation lors de l'ébullition est supérieur à 8%. Le temps de retour étant supérieur à 5 ans, cette solution est donc écartée. La valeur actualisée nette de cet investissement est de -854,71€ au bout de 10 ans.

La quantité de vapeur récupérée par brassin est assez faible, ce qui impacte directement le temps de retour de cet investissement. Cette faible quantité a différentes causes : un volume de 15 HL/brassin, un taux d'évaporation faible de 8% ainsi qu'une fréquence de brassage d'un à 3 brassins/semaine. L'augmentation d'un de ces trois facteurs permettrait de diminuer le temps de retour sur investissement.

5.2.3. Production d'eau chaude à partir de panneaux solaires thermiques

L'installation solaire thermique dimensionnée est de 17m² avec une fraction solaire de 40%, une inclinaison de 35° et une orientation sud-est. L'eau est préchauffée à une température de 50°C.

L'étude de l'évolution du cashflow cumulé actualisé de l'implémentation d'une installation de production d'eau chaude à partir de panneaux solaires thermiques de la brasserie BeerFac est visible sur la Figure 32.

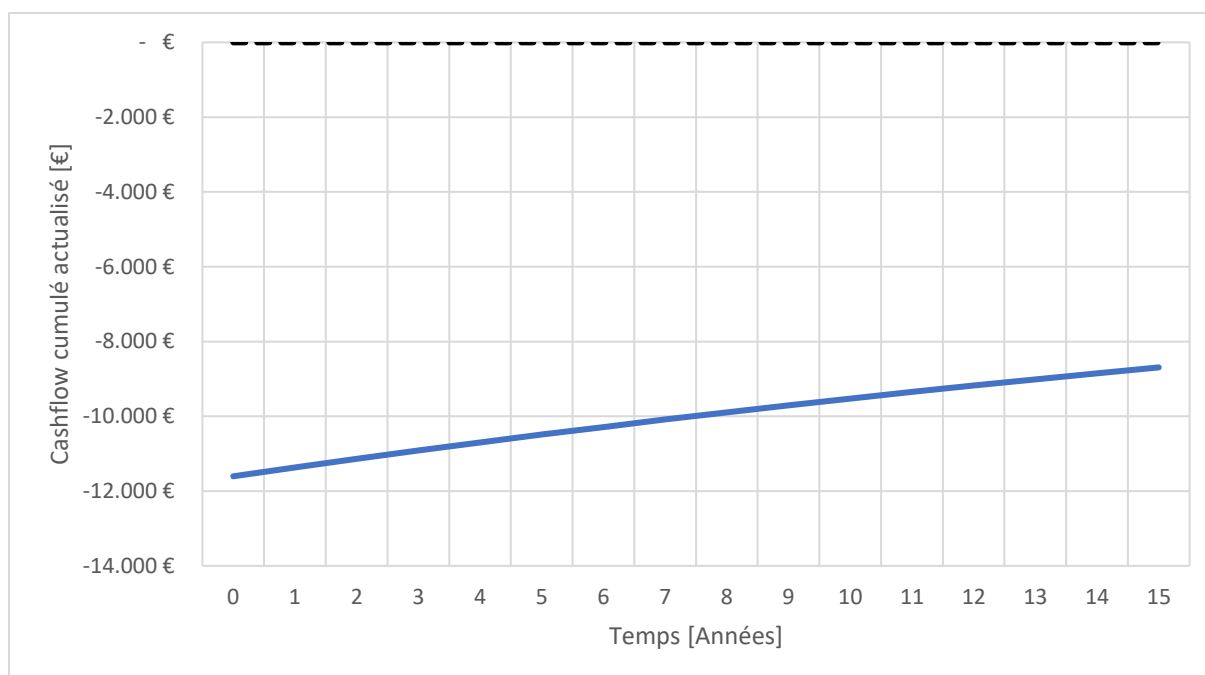


Figure 34 : Evolution du cashflow cumulé actualisé lors de l'investissement dans une installation solaire thermique de la brasserie BeerFac.

Le temps de retour est supérieur à 40 ans. Le gain apporté pour ce type d'installation s'élève à 243€/an alors que le coût d'investissement net est de 11 605€. Le temps de retour est largement supérieur aux 5 ans escomptés. La valeur actualisée nette de cet investissement est de – 9 525,33€ au bout de 10 ans. Cette solution est donc écartée pour la brasserie BeerFac. Le temps de retour élevé est expliqué par la faible quantité d'énergie captée par les panneaux. En effet, le rayonnement solaire est estimé à environ 1000 W/m².an en Belgique. Le rendement de l'installation étant estimé à environ 40%, ce sont 400 W/m².an qui sont récupérés, ce qui correspond à une quarantaine de litres de mazout. Cela correspond à un gain énergétique de 20€/an (si le mazout est à 0,5€/L) alors que le coût d'un panneau est de 650€/m².

5.2.4. Discussion

Actuellement, aucune des trois solutions étudiées ne permet d'atteindre un temps de retour inférieur à 5 ans. Ces différentes techniques sont actuellement inadaptées à la brasserie BeerFac. Néanmoins, une augmentation du volume brassé permettrait de diminuer les différents temps de retour et ainsi justifier l'implémentation d'une de ces technologies. L'influence de la taille de la brasserie sur le temps de retour de ces différents investissements sera étudiée dans le chapitre 5.3.

5.3. Étude de sensibilité au volume brassé

5.3.1. Condensation des vapeurs d'ébullition

Le temps de retour simple du placement d'un échangeur sur les vapeurs d'ébullition en fonction du type de carburant (au cours du 18/07/2020) et du volume brassé est visible sur la Figure 35.

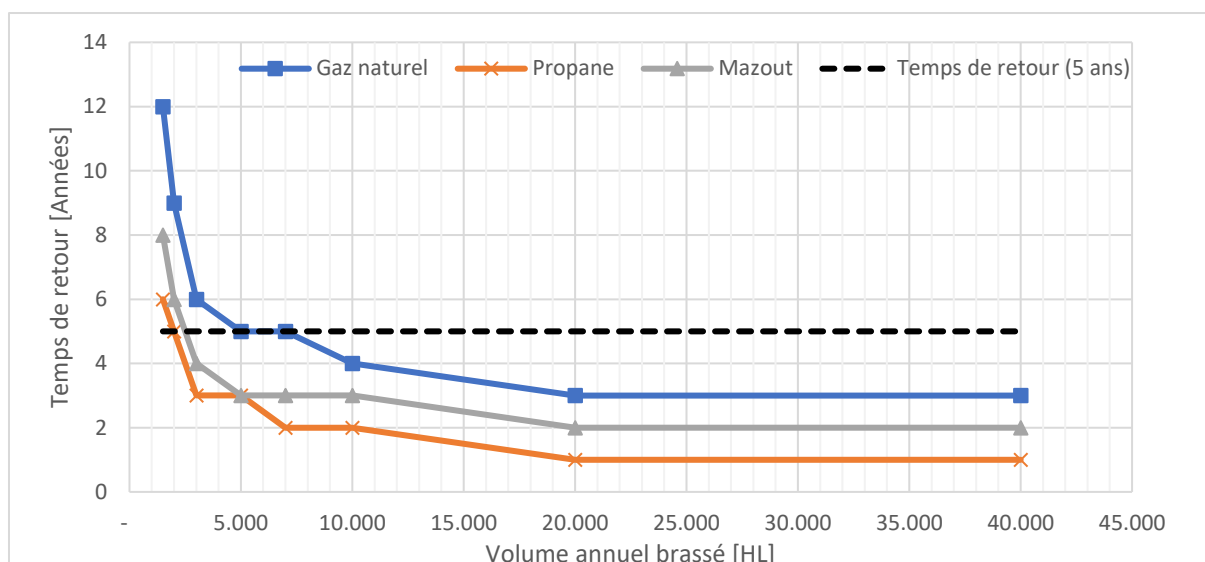


Figure 35 : Evolution du temps de retour simple sur investissement d'un échangeur sur les vapeurs de la cuve d'ébullition en fonction du type de carburant et du volume brassé.

Le temps de retour sur investissement est inférieur à 5 ans pour les 3 types de carburants (à partir d'une brasserie de 5000 hectolitres annuels). Il faudra donc, au plus, brasser 5 000 HL/an pendant 5 ans pour rentabiliser cet investissement, soit un volume de 25 000 HL. Plus le coût du carburant (€/kWh) augmente, plus le volume à brasser diminue pour atteindre l'objectif d'un temps de retour de 5 ans, car l'économie financière réalisée par kWh est plus importante. Le coût du carburant influence donc sensiblement le temps de retour l'investissement.

Un autre facteur ayant une influence sur la rentabilité d'un échangeur de vapeur est le taux d'évaporation lors de l'ébullition. Au plus celui-ci augmente, au plus la rentabilité sera importante. Ce facteur est cependant moins influent que le coût du carburant.

Enfin, le rendement de la chaudière impacte le temps de retour. En effet, plus le rendement va décroître, plus l'économie réalisée sera importante, le coût de production d'un kWh par la chaudière augmentant.

5.3.2. Économiseur sur les fumées de la chaudière

L'évolution du temps de retour simple d'un économiseur de fumées est visible sur la Figure 36 pour le mazout, la Figure 37 pour le propane et la Figure 38 pour le gaz naturel. Ces différents graphiques ont été construits sans prendre en compte les primes disponibles lors de la récupération d'énergie. Ils représentent dès lors le temps de retour sur investissement le plus défavorable.

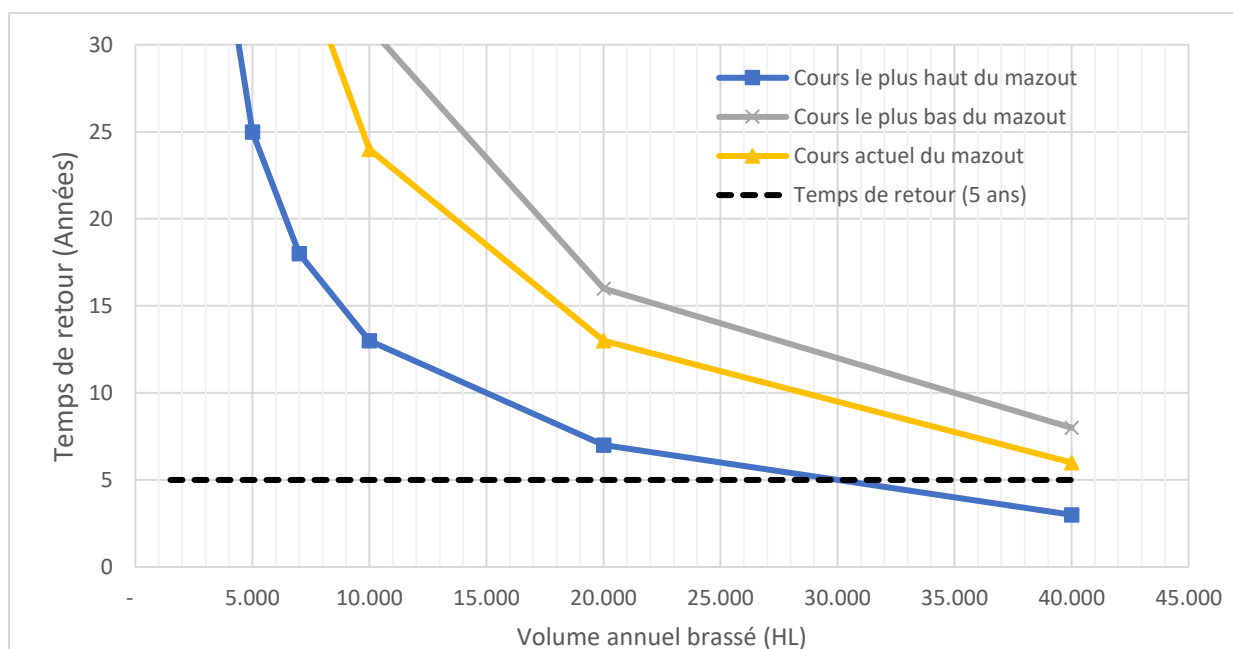


Figure 36 : Évolution du temps de retour simple sur investissement d'un économiseur de fumées en fonction du volume brassé et du cours le plus haut/bas/actuel du mazout sur les 10 dernières années.

Lors de l'utilisation du mazout comme carburant, le temps de retour pour une brasserie produisant 1500 hectolitres annuels varie entre 85 et 207 ans (cours le haut/bas). Afin de rentabiliser l'investissement en 5 ans, il faudrait brasser environ 30 000 HL/an pendant 5 ans, soit un volume total de 150 000 HL (au cours le plus haut du mazout, soit 0,88€/l).

Avec le cours actuel du mazout (0,046€/kWh), le brassage de plus de 40 000 HL/an de bière est nécessaire durant 5 ans afin de rentabiliser le placement d'un économiseur de fumées.

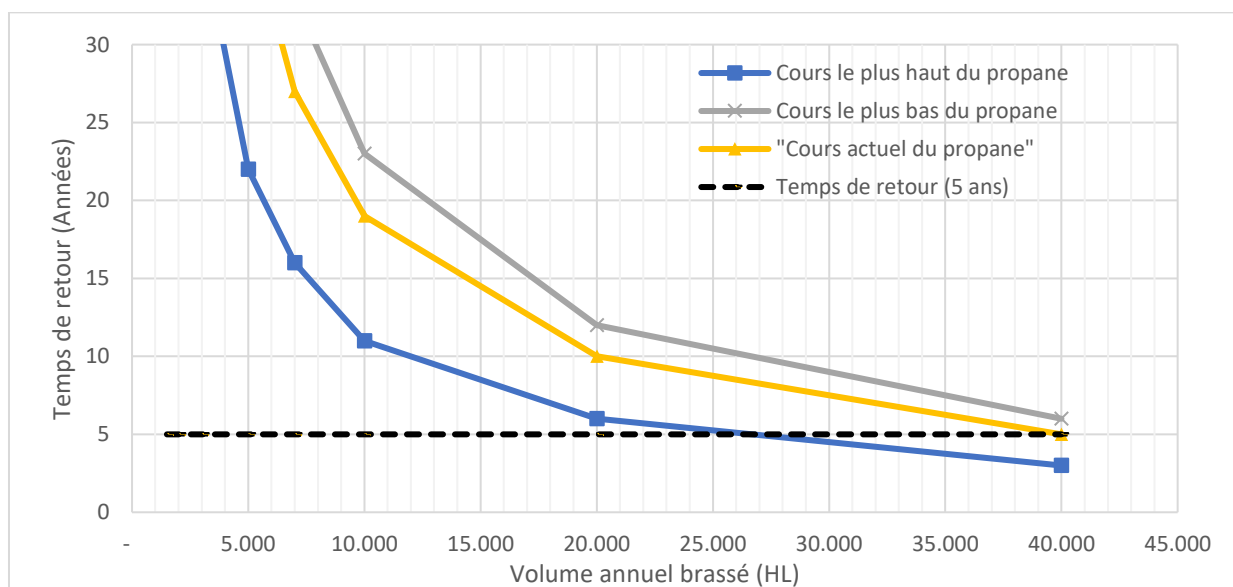


Figure 37 : Évolution du temps de retour simple sur investissement d'un économiseur de fumées en fonction du volume brassé et du cours le plus haut/bas/actuel du propane sur les 10 dernières années.

Lors de l'utilisation du propane comme combustible, le temps de retour pour une brasserie de 1500 hectolitres annuels varie entre 73 et 155 ans comme le montre la Figure 38. Ce temps de retour est donc plus court que pour le mazout, ce qui s'explique par un coût de revient plus élevé au kWh (coût

variant entre 0,048 et 0,108 €/kWh pour le propane contre 0,036 à 0,088 €/kWh pour le mazout). Dans le cas le plus favorable (propane à son cours le plus élevé, soit 0,108€/kWh), un peu moins de 30 000 HL/an devraient être brassés pendant 5 ans afin de rentabiliser l'investissement, soit un volume total de 150 000 HL.

Actuellement, les cours sont assez bas (0,059€/kWh) et 40 000 HL/an hectolitres doivent être brassés avant d'atteindre le seuil de rentabilité.

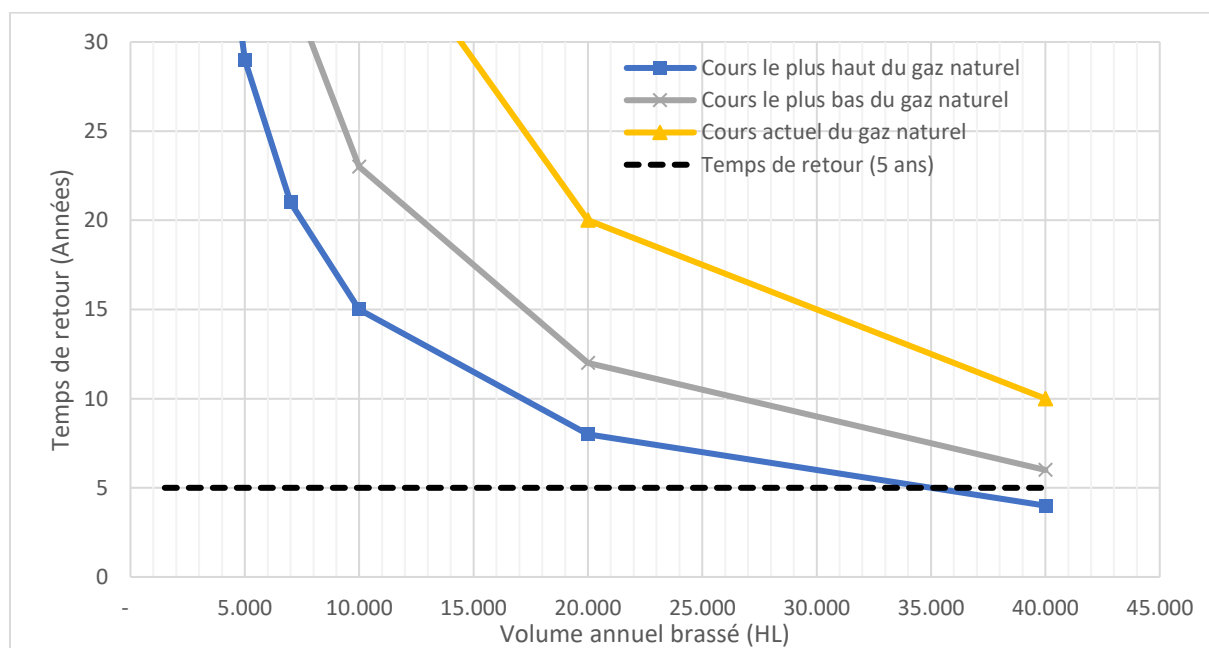


Figure 38 : Évolution du temps de retour sur investissement d'un économiseur de fumées en fonction du volume brassé et du cours le plus haut/bas/actuel du gaz naturel sur les 10 dernières années.

L'utilisation du gaz naturel comme combustible mène à un temps de retour compris entre 98 et 251 ans lorsque 1500 hectolitres sont brassés annuellement. Ce temps de retour est plus long que pour les deux autres carburants étudiés, ce qui s'explique par son coût plus faible (entre 0,029 et 0,076 €/kWh). Au cours actuel du gaz naturel (0,029€/kWh), la production de plus de 80 000 HL/an durant 5 ans est nécessaire pour justifier cet investissement.

Le prix du carburant est le facteur influençant le plus sensiblement le temps de retour sur investissement. Différents autres facteurs comme le rendement de la chaudière ou la température des fumées ont également un impact sur la rentabilité d'un tel investissement. Cette variabilité n'a pas été mise en graphique, car la différence de température n'influencera que très légèrement les résultats en comparaison au prix du carburant qui peut varier du simple au double.

5.3.3. Production d'eau chaude à partir de panneaux solaires thermiques

L'évolution du temps de retour simple de l'installation de panneaux solaires thermiques au cours actuel du carburant est visible sur la Figure 39.

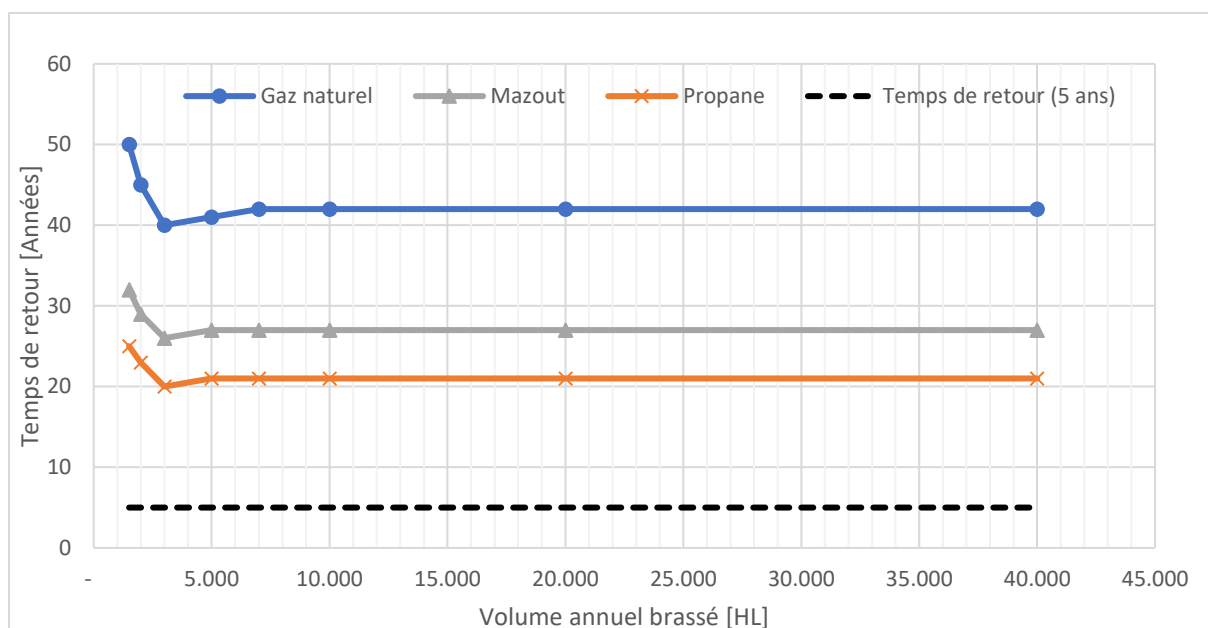


Figure 39 : Evolution du temps de retour simple sur investissement d'une installation de panneaux solaires thermiques en fonction du type de carburant utilisé et du volume brassé.

Aucun des trois carburants étudiés ne présente un temps de retour inférieur à 5 ans malgré la prise en compte des primes et d'une déduction fiscale de 13,5%. Le temps de retour le plus court est de 21 ans pour le propane.

Une seule simulation a été faite pour cet outil de production énergétique. En effet, même si le coût des carburants venait à doubler, le temps de retour d'un tel investissement resterait largement supérieur à 5 ans. L'augmentation de la surface ne présente aucun impact sur le temps de retour, celui-ci étant relativement stable une fois la barre des 3000 hectolitres franchie. Dans la première partie du graphique, les temps de retour diminuent jusqu'à atteindre la barre des 3000 HL. Cette diminution s'explique par une augmentation de la surface de l'installation solaire thermique, et donc une augmentation des primes qui sont plafonnées à un maximum de 6000 €. C'est pourquoi les différentes courbes deviennent relativement stables par la suite.

Une grande différence est observable en fonction du type du carburant, ce qui s'explique par leur différence de coût [€/kWh].

5.4. Normalisation par rapport aux paramètres actuels

Premièrement, la normalisation par rapport au coût actuel des différents carburants a été calculée pour les 8 tailles de brassin sur base du temps de retour sur investissement d'un économiseur sur les fumées de combustion d'une chaudière fonctionnant au propane. Les coefficients trouvés sont visibles sur la Figure 40.

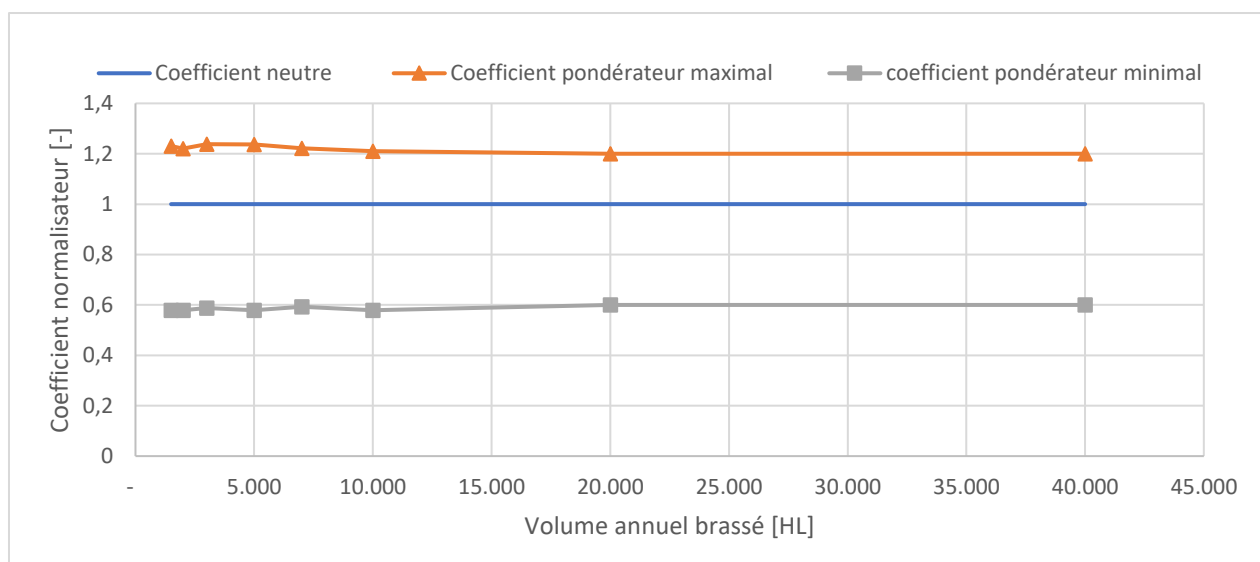


Figure 40 : Coefficients normalisateurs par rapport au coût actuel du propane lors de l'investissement dans un économiseur de fumée.

Les coefficients calculés pour chaque taille de brassin sont similaires. Un coefficient normalisateur minimal/maximal peut donc être déterminé en réalisant la moyenne des différentes valeurs trouvées pour chaque taille de brassin. Ces coefficients ont également été déterminés pour le mazout et suivent la même tendance que pour le propane. Ceux-ci sont repris dans le Tableau 14. Concernant le gaz naturel, les coefficients n'ont pas pu être déterminés, le cours actuel étant le cours le plus bas observé sur la dernière décennie.

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des coefficients normalisateurs minimaux/maximaux par rapport au prix actuel du carburant lors de l'investissement dans un économiseur de fumées.

Type de carburant	Coefficient normalisateur minimal	Coefficient normalisateur maximal
Mazout	0.52	1.276
Propane	0.587	1.22

Le même exercice a été réalisé pour les condenseurs sur les vapeurs d'ébullition. Il existe cependant une plus grande variabilité entre les coefficients déterminés en fonction de la taille du brassin. Une moyenne a été réalisée pour chaque type de carburant. Afin d'objectiver les données, cet exercice a été réalisé en faisant varier le taux d'évaporation. Les résultats obtenus peuvent être consultés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Tableau récapitulatif des coefficients normalisateurs minimaux/maximaux par rapport au prix actuel du carburant et de différents taux d'évaporation lors de l'investissement dans un condenseur de vapeur.

Type de carburant	Coefficient normalisateur minimal	Coefficient normalisateur maximal
Mazout (10% évap)	0,395	1,23
Mazout (8% évap)	0,492	1,291
Mazout (12% évap)	0,495	1,242
Moyenne mazout	0,461	1,254
Propane (10% évap)	0,7	1,483
Propane (8% évap)	0,62	1,354
Propane (12% évap)	0,596	1,317
Moyenne propane	0,639	1,385

Il existe une variabilité plus importante entre les coefficients en fonction du taux d'évaporation appliqué.

Au point de vue des moyennes par type de carburant, les résultats obtenus diffèrent des coefficients calculés pour l'investissement dans un économiseur de fumée. Cela peut provenir de plusieurs raisons :

- Les temps de retours sur investissement sont des valeurs arrondies à l'unité, ce qui amène une variabilité au sein des coefficients normalisateurs calculés ;
- Les prix des échangeurs sur les vapeurs d'ébullition augmentent avec la puissance de ceux-ci. Cette augmentation n'est pas linéaire ce qui entraîne une modification des coefficients normalisateurs.

Malgré une variabilité importante, ces coefficients permettent quand même de prévoir une fourchette de temps de retour relativement fiable en fonction des cours minimaux/maximaux des carburants au cours des 10 dernières années. Ils permettent d'envisager la variabilité que peut apporter la fluctuation du prix des carburants sur le temps de retour des différents investissements.

Le même raisonnement a été utilisé pour déterminer des coefficients normalisateurs quantifiant l'impact de la modification du taux d'évaporation. Pour rappel, ce taux varie en fonction du type de bière brassée (une bière plus forte en alcool nécessite une évaporation plus importante), mais également en fonction de la technologie utilisée pour réaliser l'ébullition. Ainsi, le temps de retour avec une évaporation de 8 et 12% sera comparé avec le temps de retour d'une évaporation moyenne de 10%. Ces comparaisons ont été effectuées pour le mazout et le propane au cours actuel, minimal et maximal. Les résultats obtenus sont visibles dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Evolution du coefficient normalisateur en fonction du prix actuel/minimal/maximal du carburant et du taux d'évaporation.

Type de carburant	Coefficient normalisateur prix actuel	Coefficient normalisateur prix maximal	Coefficient normalisateur prix minimal	Moyenne
Mazout (12%/10%)	0,995	1,013	0,969	1,0
Mazout (8%/10%)	1,188	1,25	1,135	1,2
Propane (12%/10%)	1,121	0,979	0,927	1,0
Propane (8%/10%)	1,296	1,167	1,156	1,2

Plusieurs informations intéressantes ressortent de ce tableau. Premièrement, un coefficient normalisateur de 1,2 est commun aux deux types de carburant lorsque l'on divise le temps de retour avec une évaporation de 8% par rapport aux 10% actuels. Dans ce cas, une proportionnalité semble donc apparaître.

Ce n'est en revanche pas le cas lorsqu'un taux d'évaporation de 12% est appliqué. Une explication de ce coefficient 1 est probablement le coût d'investissement supplémentaire dans un échangeur plus puissant, car la quantité de vapeur dégagée durant l'ébullition sera supérieure. Plus d'énergie sera récupérée, mais l'investissement sera plus important ce qui explique cette faible variabilité des temps de retour.

Cette différence provient de la discrétisation du coût des échangeurs eau/vapeur en fonction de leur puissance. En effet, seules 9 puissances d'échangeurs ont été évaluées. Sur une infinité de puissances (et donc de coûts), le coût de l'investissement devrait augmenter de manière continue en fonction de la puissance de l'échangeur. Les coefficients devraient donc avoir une valeur de 1. Dans le cas présent, le coefficient 1.2 trouvé correspond probablement à l'utilisation d'un échangeur de puissance moindre (et donc de moindre coût) par rapport à la situation actuelle (10% d'évaporation).

Il est ensuite intéressant de constater que les coefficients normalisateurs sont relativement similaires quel que soit le coût du carburant, ce qui confirme que seul le taux d'évaporation influence le coefficient.

6. Conclusion

En conclusion, l'objectif premier de ce travail était d'effectuer une revue de la littérature afin d'identifier différentes techniques de récupération d'énergie thermique dans le procédé brassicole applicables à des microbrasseries. Ce travail bibliographique a permis de mettre en évidence 4 technologies.

La première est l'installation d'une nouvelle chaudière présentant un rendement supérieur à l'actuelle. En effet, l'augmentation du rendement permet de diminuer de manière conséquente la consommation énergétique annuelle de l'entreprise. Les chaudières actuelles disposent de nouvelles technologies telles que la condensation des fumées dégagées qui permet d'augmenter le rendement de l'ordre de 6 à 10% et donc d'atteindre des rendements supérieurs à 100% sur PCI.

Différents types de carburants sont disponibles et induisent également une diminution de l'impact écologique de l'établissement. L'utilisation du bois, par exemple, permet de se rapprocher de la neutralité d'un point de vue CO₂ bien que son utilisation reste plus onéreuse que celle des combustibles fossiles plus traditionnels.

La seconde méthode mise en évidence est l'installation d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition. Cette technique permet de récupérer la chaleur latente contenue dans les vapeurs d'ébullition afin de préchauffer de l'eau qui sera utilisée lors de la production de vapeur ou pour un brassin ultérieur. L'intégration d'un condenseur dans le process est aisée, nécessite des coûts d'investissements faibles et apporte un gain énergétique confortable.

En troisième lieu, l'installation d'un économiseur sur les fumées de la chaudière vapeur a été retenue. En effet, les fumées à haute température contiennent de la chaleur fatale. Sans économiseur, cette chaleur est perdue. L'installation d'un économiseur permet d'augmenter le rendement de la chaudière de l'ordre de 1% lors de l'abaissement de la température des fumées de 22°C. Celui-ci apporte donc un gain énergétique conséquent lorsque des chaudières de puissance importante sont utilisées dans les brasseries. Le rendement d'un économiseur est influencé par différents facteurs tels que le débit de fumée et sa température.

Enfin, la dernière technologie est l'installation de panneaux solaires thermiques permettant de préchauffer l'eau utilisée pour la production de vapeur ou pour le brassage. Ce type d'installation permet d'utiliser de l'énergie renouvelable et donc de diminuer la consommation d'énergie fossile de la brasserie. Leur rendement est influencé par l'orientation et l'inclinaison de l'installation ainsi que par la fraction solaire retenue.

Le second objectif de ce travail était d'effectuer une analyse financière des techniques identifiées lors de la première partie de cette étude. Cette analyse financière comporte une étude graphique de l'évolution du cashflow cumulé actualisé de la brasserie BeerFac pour chacune des technologies retenues. Une étude de sensibilité du volume brassé sur le temps de retour est ensuite réalisée. Enfin, des coefficients normalisateurs des prix maximaux/minimaux sur les 10 dernières années des différents carburants par rapport à leur cours actuel sont déterminés. Ces coefficients sont également calculés pour différents taux d'évaporation.

L'analyse financière de l'implémentation d'une nouvelle chaudière n'a pas pu être effectuée pour différentes raisons. Tout d'abord, le dimensionnement d'une nouvelle chaudière nécessite une connaissance précise des différents postes consommateurs d'énergie thermique au sein de la brasserie. Ceux-ci ne peuvent être déterminés qu'après une étude plus approfondie de l'entreprise, ce

qui n'est pas compatible avec ce travail qui se veut généraliste et applicable à un large panel de brasseries. Ensuite, il existe une grande variabilité dans le coût des chaudières en fonction de leur marque ou encore de leur rendement. Il est donc difficile d'assigner un coût sans connaître précisément les désidératas du brasseur. Enfin, le coût du placement d'une telle chaudière est également extrêmement variable en fonction des cas. Pour l'ensemble de ces raisons, l'étude financière du placement d'une nouvelle chaudière n'a pas été effectuée.

L'analyse financière du placement des 3 technologies de récupération/production d'énergie thermique au sein de la Brasserie BeerFac révèle qu'aucune de ces technologies ne permet d'atteindre un temps de retour inférieur à 5 ans. L'installation de ces différents outils est dès lors rejetée pour la production actuelle de la brasserie (2500 HL/an). L'analyse de sensibilité met en évidence une nécessité de brasser 5000 hectolitres annuels avec un taux d'évaporation de 10% en considérant le coût actuel du carburant afin d'atteindre un temps de retour de 5 ans lors de l'installation d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition. Les coefficients normalisateurs montrent une augmentation/diminution du temps de retour avec la diminution/augmentation du prix du carburant par rapport à son coût actuel (mazout : 0,461-1,254 ; propane : 0,639-1,385). Par contre, l'augmentation du taux d'évaporation n'impacte pas sensiblement le temps de retour sur investissement. En effet, cette augmentation nécessite l'utilisation d'échangeurs plus puissants dont le coût est plus important. Les coefficients normalisateurs (1,2-1) ne le reflètent cependant pas pour deux raisons : le temps de retour est arrondi à un nombre entier, la puissance et le coût des échangeurs ont dû être discrétisés ; entraînant un biais dans les coefficients.

L'analyse de sensibilité de l'installation d'un économiseur de fumée révèle qu'un volume annuel supérieur à 40 000 HL est nécessaire pour atteindre un temps de retour de 5 ans. Les coefficients normalisateurs confirment l'influence du prix du carburant sur le temps de retour (mazout : 0,52-1,276 ; propane : 0,587-1,22).

Lors de l'installation de panneaux solaires thermiques, le temps de retour minimal est de 21 ans au cours actuel du propane, quel que soit le volume annuel brassé. Aucune simulation supplémentaire n'a été effectuée, car même dans l'hypothèse où le coût du carburant doublerait, le temps de retour resterait supérieur à 5 ans. Un plafond dans le temps de retour est atteint une fois que le volume annuel arrive à 5000 HL quel que soit le type de carburant utilisé, car les primes sont plafonnées à 6000 € (soit une installation de 22 m²).

Pour conclure, l'analyse de sensibilité en fonction du volume brassé démontre que seule l'implémentation d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition permet d'obtenir un temps de retour inférieur à 5 ans en microbrasserie d'une capacité inférieure à 12 500 HL/an. En fonction du coût (€/kWh) du carburant, des brasseries d'une capacité minimale d'environ 5000 HL annuels peuvent envisager ce type d'investissement. Le placement d'un économiseur sur les fumées de la chaudière nécessite de brasser d'importants volumes annuels afin d'obtenir un temps de retour satisfaisant. L'installation de panneaux solaires thermiques n'est pas rentable, mais permet néanmoins de produire de l'eau chaude en utilisant une source d'énergie renouvelable. L'étude de sensibilité au volume brassé a permis de mettre en évidence l'impact important du prix du carburant sur le temps de retour sur investissement. Lors de l'installation d'un condenseur sur les vapeurs d'ébullition, la variation du taux d'évaporation impacte peu le temps de retour, car les coûts d'investissements vont varier de manière similaire.

Il est important de rappeler que ce travail se veut généraliste et permet uniquement de donner un ordre d'idée du temps de retour en fonction de différentes caractéristiques d'une microbrasserie. Une étude de préféabilité plus approfondie par un bureau d'étude compétent est donc nécessaire afin

d'affiner les résultats déterminés dans ce travail. L'étude plus précise de plusieurs brasseries aurait également permis de générer des résultats plus précis. Cela n'a cependant pas été possible à cause de la crise sanitaire liée au COVID-19. Cependant, cette étude permet de donner un aperçu du temps de retour sur investissement des différentes technologies étudiées afin d'envisager ou non d'investir dans un outil de récupération d'énergie. Enfin, il est également nécessaire de rappeler que les différents temps de retour ne prennent pas en compte l'installation d'une bâche d'eau chaude isolée ainsi que le *piping*, les coûts d'installations, etc. Une contingence a été ajoutée afin de couvrir ces frais, mais il subsiste une grande variabilité dans ces coûts qui devra être déterminée via une étude plus approfondie de la brasserie.

7. Bibliographie

(ICEDD), I. d., & Econotec, C. (2010, Septembre). La production de vapeur. *Economies d'énergie dans l'industrie*.

3D animation The art of brewing. (s.d.). Récupéré sur Lothbrok: <https://lothbrok.de/en/>

Annexe 2 - Valeur actualisée 1/. (1984). Récupéré sur Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture: <http://www.fao.org/3/s8500f/s8500f0m.htm>

Arrêté ministériel relatif aux modalités et à la procédure d'octroi des primes visant à favoriser l'utilisation rationnelle de l'énergie. (2010, Avril 30). Récupéré sur Wallex: <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/1/1146/1.html?doc=16958>

ASHRAE Handbook. (1985). *Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Aubinet, M. (2014). *Thermodynamique*.

Aubinet, M., & Longdoz, B. (2017). *Physique de l'environnement*.

Bombeck, P.-L. (2020, Marc). *Evolution 2008-2019 des prix des combustibles bois*. Récupéré sur Valbiom- Valorisation de la biomasse asbl: <https://monprojet.labiomasseenwallonie.be/thematiques/bois-energie>

Brasseries belges. (s.d.). Récupéré sur bierebel: <http://www.bierebel.com/brasseries-belges>

Cadre d'action en matière de climat et d'énergie d'ici à 2030. (s.d.). Récupéré sur Commission européenne: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr

Capteur solaire à eau chaude. (2010, Septembre 22). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/techniques/eau-chaude-sanitaire11/differents-preparateurs/capteur-solaire-a-eau-chaude-d1/>

Chaleur sensible et chaleur latente. (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/echanges-chaleur-parois/chaleur-sensible-et-chaleur-latente/>

Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ? (2012, Mai 10). Récupéré sur Wallonie Energie SPW: <https://energie.wallonie.be/fr/chaudiere-ou-generateur-de-vapeur-lequel-de-ces-deux-moyens-de-production-repond-t-il-le-mieux-a-mes-besoins.html?IDC=8038&IDD=97663>

Chaudières à condensation [chauffage]. (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-a-eau-chaude/chaudieres-a-condensation/>

Choisir le combustible : bois, gaz et fuel. (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/chauffage/choisir-le-chauffage-central-a-eau-chaude/choisir-le-combustible-bois-gaz-et-fuel/>

Combustion et combustibles. (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/combustion-et-combustibles/>

Comment la vapeur fournit-elle un chauffage rapide ? (s.d.). Récupéré sur generateur vapeur: <http://www.generateurvapeur.com/applications/dblenveloppe.htm>

- Communiqué de presse euro indicateurs.* (2019, mai 3). Récupéré sur Eurostat:
<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9760518/2-03052019-AP-FR.pdf/8fbd0b1f-cbd4-4a13-8e94-c40535fde43c>
- Composition de l'air.* (2020, Février 09). Récupéré sur www.webphysique.fr:
<http://www.webphysique.fr/composition-de-lair/>
- Coups de bélier : le mécanisme.* (s.d.). Récupéré sur TLV spécialiste de la vapeur:
<https://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/waterhammer-mechanism.html>
- Cuves ébullition GAZ - 100 à 800 Litres.* (s.d.). Récupéré sur AURA Industrie: <http://cuve-brasserie.com/categorie-produit/materiel-brasserie/cuve-inox-chauffage-gaz-rapide/cuves-inox-brasserie-ebullition-inox-gaz/>
- Déduction pour investissement.* (s.d.). Récupéré sur Service Public Fédéral FINANCES:
https://finances.belgium.be/fr/entreprises/impot_des_societes/avantages_fiscaux/deduction_pour_investissement#q2
- Dethier, M. (2010, Octobre). *Le diagnostic des systèmes de chauffages de type 1.* Récupéré sur Environnement.brussels:
https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/201010%20diagnostic%20type1%20Prof%20FR
- Différents types d'échangeurs de chaleur.* (2015, Avril 08). Récupéré sur Energie.wallonie.be:
<https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759>
- Echangeur à plaques.* (2007, Septembre 25). Récupéré sur <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygienique/composants-de-la-ventilation/recuperateurs-de-chaleur/echangeur-a-plaques/>
- EDF. (s.d.). *Analyse technico-économique des solutions de récupération de chaleur identifiées.*
- Estimer le surdimensionnement d'une chaudière.* (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/evaluer/chauffage4/evaluer-efficacite-energetique-production-chaleur/estimer-le-surdimensionnement-d-une-chaudiere/>
- Evaluer l'efficacité énergétique de la production d'eau chaude sanitaire.* (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/evaluer/eau-chaude-sanitaire5/evaluer-l-efficacite-energetique-de-la-production-d-eau-chaude-sanitaire/>
- Faiveley, M. (2020, Février 10). *Fabrication des bières.* Récupéré sur Techniques de l'ingénieur.
- Fonctionnement d'un échangeur à plaques.* (s.d.). Récupéré sur Factory Future:
<https://www.factoryfuture.fr/fonctionnement-echangeur-plaques/>
- Fronhoffs, J. (2015, Septembre 22). *Récapitulatif des principaux producteurs de chaleur.* Récupéré sur Environnement brussels:
https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres_20150922_chau_1_4recap_fr.pdf
- HICP-Annual percentage changers, breakdown by purpose of consumption : June 2020.* (2020, Juin). Récupéré sur European central bank:

https://www.ecb.europa.eu/stats/ecb_statistics/escb/html/table.en.html?id=JDF_ICP_COIC_OP_ANR

Importance de l'orientation et des types de structures. (s.d.). Récupéré sur Energie Facteur 4:
<http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/orientation-structure.html>

Intégration des énergies renouvelables et de récupération dans l'industrie - Fiche technique Fumées de chaudières à vapeur. (2018, Décembre). Récupéré sur www.bioenergie-promotion.fr:
https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2018/12/fumees-chaudiere-vapeur_fiche-technique-integration-dans-industrie-2018.pdf

Interpréter la fiche d'entretien d'une chaudière. (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/evaluer/chauffage4/evaluer-efficacite-energetique-production-chaleur/interpreter-la-fiche-d-entretien-d-une-chaudiere-ou-une-mesure-des-parametres-de-combustion/>

Kilowattheure. (2019, Octobre 18). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/glossaire/kilowattheure/>

Laguerre, D. (s.d.). *Mesure du pouvoir calorifique des gaz.* Récupéré sur Techniques de l'ingénieur:
https://books.google.be/books?hl=fr&lr=&id=3rVnAukBkzoC&oi=fnd&pg=PA1&dq=pouvoir+calorifique+inf%C3%A9rieur&ots=2ZOD6gTqpD&sig=uluDD_A6ZKXb_zlW7m9x4rBJc-U&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Lauter tuns and brewing equipment. (s.d.). Récupéré sur portlandkettleworks:
<https://www.portlandkettleworks.com/lauter-tuns-and-brewing-equipment/>

Michel, B. (2020). *Concept et évaluation de projets.*

Micro-brasseries : une bulle prête à exploser ? (2019, Octobre 23). Récupéré sur Moustique:
<https://www.moustique.be/24796/micro-brasseries-une-bulle-prete-exploser>

Mosher, M., & Trantham, K. (2017). *Brewing Science : A Multidisciplinary Approach.* Switzerland: Springer .

Pertes de chaleur des conduites et vannes non isolées. (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/donnees/chauffage56/pertes-de-chaleur-des-conduites-et-vannes-non-isolees/>

Prédimensionner l'installation d'ECS. (2010, Septembre 2). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/eau-chaude-sanitaire3/choisir-un-prechauffage-par-capteurs-solaires-thermiques/predimensionner-l-installation-d-ecs/>

Prime pour l'installation d'un chauffe-eau solaire (prime Soltherm-ancien régime). (2019, Janvier 18). Récupéré sur Wallonie énergie SPW: <https://energie.wallonie.be/fr/prime-pour-l-installation-d-un-chauffe-eau-solaire-prime-soltherm-ancien-regime.html?IDC=6178&IDD=126442>

Processus de brassage en fermentation haute. (s.d.). Récupéré sur Palm:
http://newpalm.androidlabs.be/uploads/goudenboom/brouwschema_hogegisting_FR_BOOM.pdf

Qu'est-ce que l'inflation. (s.d.). Récupéré sur Banque centrale européenne:
<https://www.ecb.europa.eu/ecb/educational/hicp/html/index.fr.html>

- Rendement d'une chaudière.* (2017, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/rendement-d-une-chaudiere/>
- Rendement d'une installation solaire thermique.* (2010, Aout 27). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/theories/eau-chaude-sanitaire12/rendement-d-une-installation-solaire-thermique/>
- Revue historique de l'économie de la bière.* (2017, Marc 29). Récupéré sur Inter Wine & Dine: <https://interwd.be/revue-historique-de-leconomie-de-biere/>
- Senden, G. (2008). *Gestion de l'énergie dans l'entreprise*. Liège: Editions des CCI SA.
- Senden, G. (2020, Mars 10). (M. Vronen, Intervieweur)
- Tableau de bord, consommation de combustibles.* (2007, Septembre 25). Récupéré sur Energieplus, le site: <https://energieplus-lesite.be/gerer/energie-et-consommations/Etablir-la-comptabilite-energetique/tableau-de-bord-consommation-de-combustibles/>
- Transfert de chaleur de la vapeur.* (s.d.). Récupéré sur TLV Spécialiste de la vapeur: <https://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/steam-heating-mechanism.html>
- Une réaction chimique : la combustion du méthane.* (s.d.). Récupéré sur www.4ac-nancy-metz.fr: http://www4.ac-nancy-metz.fr/clg-albert-camus-moulins-les-metz/spip/IMG/pdf_3_chi_reaction_chimique_combustion_methane.pdf
- ValBiom. (2006, Janvier). *Les coûts et les performances des installations de chauffage au bois*. Récupéré sur Energie.wallonie.be: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/les-couts-et-performances-des-installations-de-chauffage-au-bois.pdf?ID=32352>
- ValBiom. (2006, Janvier). *Les coûts et les performances des installations de chauffage au bois*. Récupéré sur Energie.wallonie.be: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/les-couts-et-performances-des-installations-de-chauffage-au-bois.pdf?ID=32352>
- Vollhals, B. (1994). Energy saving in the brewhouse. *MBAA Tech Q31*, pp. 1-4.
- Wallonie, S. P. (2015, Septembre). Le chauffage au bois. *Energie 4*.
- Willaert, R. (2007). The Beer Brewing Process : Wort Production and Beer Fermentation. Dans *Handbook of Food Products and Manufacturing*. Y. H. Hui.
- Willaert, R., & Baron, G. (2004, Décembre). Applying sustainable technology for saving primary energy in the brewhouse during beer brewing. *Clean Technologies and Environmental Policy*.
- Willart, R., & Baron, G. (2005). Applying sustainable technology for saving primari energy in the brewhouse during beer brewing. *Clean Technol Enrivot Policy* 7, pp. 15-32.
- Zogla, L., Zogla, G., Beloborodko, A., & Rosa, M. (2015, 06 29). Process benchmark for evaluation energy performance in breweries. *Elsevier Ltd*, pp. 202-208.