

---

## Optimisation énergétique de la brasserie artisanale de Rulles

**Auteur :** Auguste, Adrien

**Promoteur(s) :** Davin, Elisabeth; 2770

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/19598>

---

### *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.*

---

**ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement**

**UNI.LU – Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication**

# **OPTIMISATION ENERGETIQUE DE LA BRASSERIE ARTISANALE DE RULLES**



**AUGUSTE ADRIEN**

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLOMES DE**

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITE ENERGIES RENOUVELABLES ET  
BATIMENTS DURABLES (ULIEGE)**

**MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)**

**ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024**

**REDIGE SOUS LA DIRECTION DE ELISABETH DAVIN (ULIEGE) ET FRANCK SCHOLZEN (UNI.LU)**

**COMITE DE LECTURE :**

**PHILIPPE ANDRE  
SEBASTIEN THOMAS  
JONAS LAMBERT**

## Copyright

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 l'Université de Liège et de l'université de Luxembourg.

\*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'université de Luxembourg.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : AUGUSTE Adrien  
adrien.auguste14@yahoo.com

# Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice principale Madame Elisabeth Davin pour sa disponibilité, sa confiance et ses bons conseils.

Merci à mon co-promoteur, Monsieur Frank Scholzen d'avoir accepté de me suivre et de m'accorder de son temps dès la première année de ce Master.

Merci aux membres du comité de lecture, Monsieur P. André, Monsieur S. Thomas et Monsieur J. Lambert pour leur présence et leur relecture de ce présent travail.

Merci également à tous les enseignants et professeurs passionnés qui, tout au long de mon parcours scolaire, ont su me transmettre l'envie et la motivation d'apprendre.

Je remercie Monsieur F. Nadin pour la fourniture des plans de la brasserie qui m'ont permis de constituer une grosse part de ce travail. Merci également à Monsieur G. Verhelst pour m'avoir donné accès à son infrastructure et aux données nécessaires pour la réalisation de cette étude et également à Quentin Chauvaux pour m'avoir fourni de précieuses informations.

Merci à ma famille et à mes amis notamment Mickael Polart pour leur soutien inconditionnel durant mes études et notamment pour la relecture de mon mémoire.

Enfin merci à mes parents et plus particulièrement ma maman pour son soutien sans faille durant ces nombreuses années d'études. Merci à eux d'avoir continué à croire en moi et à me soutenir, même lors des moins bons moments.

## Résumé

---

Le mémoire se concentre sur l'optimisation énergétique de la microbrasserie de Rulles en explorant la mise en place d'un système solaire thermique. Une étude approfondie est réalisée, mettant en lumière la reconstitution de la consommation thermique de la brasserie. L'analyse inclut une évaluation de la viabilité et de l'efficacité d'un système solaire thermique dans le contexte spécifique de la brasserie. De plus, une étude économique est menée pour évaluer les coûts associés à l'implémentation du système solaire thermique et pour déterminer les avantages financiers à long terme. Cette approche vise à proposer des solutions durables pour réduire la dépendance énergétique de la microbrasserie tout en maximisant les bénéfices économiques.

## Abstract

---

The thesis focuses on the energy optimization of the Rulles microbrewery by exploring the implementation of a solar thermal system. A thorough study is conducted, highlighting the reconstruction of the brewery's thermal consumption. The analysis includes an assessment of the feasibility and efficiency of a solar thermal system in the specific context of the brewery. Furthermore, an economic study is undertaken to evaluate the costs associated with the implementation of the solar thermal system and to determine long-term financial benefits. This approach aims to propose sustainable solutions to reduce the energy dependence of the microbrewery while maximizing economic benefits.

# Table des matières

I. Introduction.....	4
II. Mise en contexte.....	5
III. Objectifs.....	7
IV. Revue de littérature.....	8
1. Fabrication de la bière.....	8
2. La consommation en énergie spécifique.....	10
3. Facteurs influençant la consommation en énergie spécifique.....	11
4. Pourquoi y'a-t-il une efficacité énergétique moindre dans les microbrasseries ?.....	12
5. L'énergie solaire thermique.....	13
a. Le rayonnement solaire.....	14
b. Installation solaire thermique : principe de fonctionnement.....	14
c. Types de capteurs.....	15
d. Rendement d'un capteur solaire thermique.....	18
e. Rendement d'une installation.....	20
f. Fraction solaire.....	20
V. Matériels et méthodes :.....	22
1. Matériel.....	22
2. Méthodes.....	22
a. Etat des lieux de la brasserie.....	24
b. Détermination des besoins en énergie thermique de la brasserie.....	31
c. Installation d'un système solaire thermique pour la production d'eau chaude.....	52
VI. Résultats et discussion.....	60
1. Consommation annuelle en énergie thermique de la brasserie.....	60
2. Production annuelle de l'installation solaire thermique.....	61
3. Résultats de l'étude économique de l'installation.....	63
4. Perspectives.....	64
VII. Conclusion.....	65
VIII. Bibliographie.....	66

## Table des figures

Figure 1 : Répartition de la consommation énergétique électrique et thermique d'une brasserie [5].....	6
Figure 2 : Les différents niveaux énergétiques d'une brasserie [28].....	10
Figure 3 : Vue horizontale d'un capteur plan opaque [8].....	15
Figure 4 : Schéma d'un capteur plan vitré [10].....	16
Figure 5 : Types de réseaux hydrauliques [8].....	16
Figure 6 : Composition des tubes sous vide [8].....	17
Figure 7 : Rendement d'un capteur solaire thermique.....	18
Figure 8 : Evolution du rendement des capteurs solaires thermiques en fonction de la différence de température entre le capteur et la température ambiante (°C) [8].....	19
Figure 9 : relation entre la fraction solaire et le taux d'utilisation.....	20
Figure 10 : Superficie de capteurs nécessaire en fonction de la fraction solaire et rendement correspondant [52].....	21
Figure 11: Brasserie de Rulles vue de haut (google map).....	25
Figure 12 : Schéma de principe du préchauffage des eaux alimentaires.....	28
Figure 13 : Schéma de principe de production de la Rulles.....	29
Figure 14 : Simulation de la demande en énergie thermique des bâtiments.....	50
Figure 15 : Vue de haut de la brasserie de Rulles (google map).....	54
Figure 16 : graphique représentant l'évolution des rendements et de la fraction solaire sur une année.....	62

## Table des tableaux

Tableau 1 : Consommation en énergie spécifique thermique et électrique de brasseries de tailles différentes.....	11
Tableau 2 : Facteur K en fonction du type de capteur.....	19
Tableau 3 : Données relatives aux différents postes de chauffage.....	31
Tableau 4 : Résultats des consommations par poste de brassage.....	34
Tableau 5 : Consommations en eau pour le CIP.....	35
Tableau 6 : Critères liés aux blocs chauds.....	35
Tableau 7 : Consommation en eau de l'enfuteuse.....	36
Tableau 8 : Résultats des consommations en eau chaude par poste ECS.....	37
Tableau 9 : Consommation énergétique de l'ECS.....	38
Tableau 10 : Calcul du taux d'infiltration.....	47
Tableau 11 : Consommation thermique annuelle de la microbrasserie de Rulles pour la production d'eau chaude.....	60
Tableau 12 : Résultats des consommations issus de la simulation Trnsys.....	61
Tableau 13 : Tableau reprenant les valeurs de rendement annuel de l'installation ainsi que la fraction solaire.....	61
Tableau 14 : Analyse économique de l'installation solaire thermique.....	63



# I. Introduction

---

La tendance actuelle du domaine brassicole consiste à se diriger vers de la production plus locale et à une échelle plus petite. En effet, ces dernières années, on voit apparaître un grand nombre de microbrasseries sur le marché, laissant part à des bières artisanales plus travaillées plutôt que des classiques « pils ». Bien qu'il n'existe actuellement pas une définition reconnue du terme « microbrasserie », il est admis qu'une microbrasserie, selon le Robert correspond à un établissement artisanal produisant de la bière en petite quantité (de la centaine d'hectolitres par an à quelques milliers selon les sources). [37]

En 2021, selon le dernier rapport publié par « The brewers of Europe », qui rassemble les associations nationales de brasseurs de 29 pays européens et dont la mission est de représenter la voie unie des brasseries d'Europe, le nombre de brasseries européennes actives est passé de 8116 en 2018 à 9465 en 2021 (sans tenir compte des pays extracommunautaires tels que la Norvège, la Suisse, la Turquie ou encore le Royaume-Uni). Parmi ces chiffres, l'apparition de nouvelles microbrasseries constitue la plus grande cause de cette augmentation. En effet, si on compare les données reprises dans le rapport, les microbrasseries sont passées de 5142 en 2018 à 6305 en 2021, correspondant à une augmentation de 22% sur 3 ans, alors que les brasseries industrielles sont passées de 2974 en 2018 à 3180 en 2021, équivalent à une augmentation de seulement 7%. [57]

En Belgique, selon l'association nationale des brasseurs belges, le pays serait constitué de 430 brasseries actives en 2022 commercialisant près de 1600 bières de marques différentes. En termes de production, cela correspondrait à près de 23,3 millions d'hectolitres, faisant de la bière une des boissons les plus consommées du pays. Comparé à 2021 (408 brasseries actives recensés en Belgique selon the brewers of Europe), 32 nouvelles brasseries artisanales auraient ainsi vu le jour en 1 an, alors qu'une douzaine de brasseries ont fermé leurs portes.[2]

Ainsi, l'émergence de nouvelles brasseries artisanales également appelées « microbrasseries » ou « craft » stimule le marché brassicole faisant de ce secteur, un des plus importants de l'agroalimentaire. Cependant, il en découle un certain coût, qu'il soit énergétique ou environnemental. En effet, il s'agit d'un secteur très consommateur en énergie primaire et également en eau potable. De plus, les coûts énergétiques représenteraient entre 8 et 10 % du revenu brut d'une brasserie. Bien que des efforts d'optimisation de ces coûts aient déjà été observés ces dernières années, ceux-ci ne concernent encore que trop peu les microbrasseries. C'est pourquoi, que ce soit dans l'intérêt purement économique du brasseur, ou bien afin de répondre aux objectifs visés par la Commission européenne dans « le pacte vert pour l'Europe », il est important de se pencher sur l'optimisation des dépenses énergétiques au sein des microbrasseries.

Ce travail a pour objectif d'étudier la possibilité d'optimisation énergétique de la microbrasserie de Rulles. Dans cette optique, une revue de littérature est d'abord entreprise, afin d'établir une compréhension commune des concepts. La seconde partie de ce travail examinera alors le matériel utilisé ainsi que la méthodologie déployée. Dans un troisième temps, nous envisagerons et simulerons un scénario, accompagné d'une brève étude économique. Enfin, les différents résultats obtenus seront présentés, critiqués et suivis de perspectives.

## II. Mise en contexte

---

La bière trône en tant que boisson alcoolisée la plus largement produite à l'échelle mondiale faisant du secteur brassicole, un des plus importants parmi les industries agroalimentaires. Cependant, cette empreinte imposante, en fait également l'un des plus impactant d'un point de vue environnementale. En 2020, la production mondiale s'élevait à 1,82 milliard d'hectolitres dont environ 341 millions d'hectolitres provenaient du continent européen. Sur le plan énergétique, cela représenterait une consommation de 81,9 TWh d'énergie thermique et 27,3 TWh d'énergie électrique. De plus, du fait de sa composition, la bière demande énormément d'eau lors de sa production.

Si on désire atteindre les objectifs visés par la Commission européenne reprises dans le pacte vert pour l'Europe [13][14], à savoir : « *transformer l'UE en une société juste et prospère, dotée d'une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitives, caractérisée par l'absence d'émission nette de gaz à effet de serre d'ici 2050 et dans laquelle la croissance économique sera dissociée de l'utilisation des ressources* », il est nécessaire d'adopter pour une nouvelle stratégie de croissance de nos sociétés, et notamment en agissant prioritairement sur les secteurs les plus demandeurs.

En ajoutant à cela, la hausse des prix de l'énergie, les entreprises, ont tout intérêt à opter pour un meilleur suivi de leur consommation et une amélioration de leur efficacité énergétique avec éventuellement la mise en œuvre de nouvelles technologies afin de limiter l'utilisation des ressources et par conséquent leur coût de production et surtout leur impact environnemental.

Bien qu'à l'heure actuelle, les plus grandes brasseries du monde aient déjà mis sur pied des techniques permettant d'optimiser la consommation énergétique des brasseries, celles-ci ne concernent encore que trop peu les microbrasseries, qui ont parfois du mal à suivre, que ce soit techniquement ou économiquement.

De plus, le secteur brassicole est un secteur très demandeur en énergie thermique. De fait, la première cause des dépenses énergétiques d'une brasserie serait liée à la production de chaleur, représentant à elle seule, 70% de la consommation totale en énergie.

On peut retrouver dans la littérature, plusieurs études qui se consacrent à l'analyse et à l'optimisation de la consommation énergétique du domaine brassicole. Elles permettent de fournir une idée des points clefs, c'est-à-dire des points sur lesquels il est le plus intéressant d'agir prioritairement si on souhaite améliorer l'efficacité énergétique d'une brasserie. Par exemple, dans un manuel éducatif rédigé par « the brewers association », on retrouve des diagrammes circulaires, repris ci-dessous. Ils permettent d'avoir une idée de la répartition de la consommation électrique et thermique pour une brasserie.

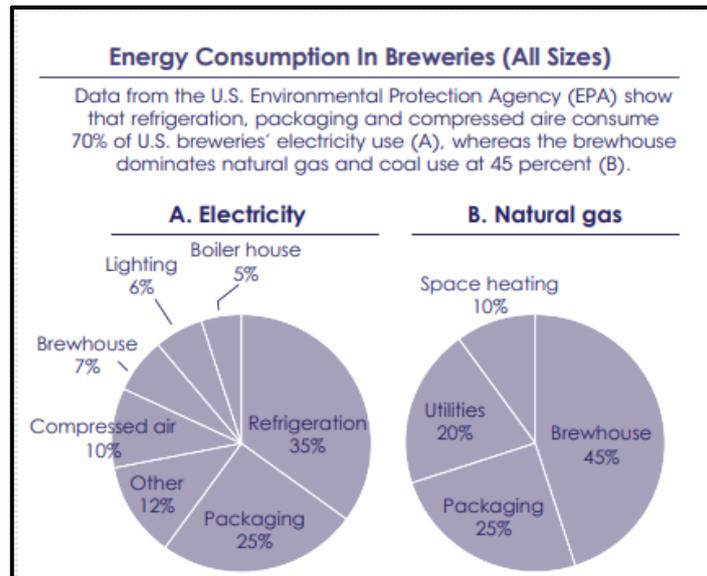


Figure 1 : Répartition de la consommation énergétique électrique et thermique d'une brasserie [5]

Ainsi, la salle de brassage représenterait à elle seule, près de 50 % des besoins en énergie thermique d'une brasserie, avec en seconde position, l'emballage de la bière. La demande de froid, quant à elle, représenterait environ 35 % de la demande en énergie électrique.

Compte tenu des circonstances, mais également de la place importante qu'occupe les dépenses en énergie au sein d'une brasserie, il est nécessaire de réfléchir intelligemment à des solutions permettant de limiter au maximum les dépenses du secteur brassicole et surtout au sein des microbrasseries qui sont de plus en plus nombreuses, en agissant notamment sur leurs besoins en chaleur lors du brassage, via l'installation de différentes techniques de récupération et d'économie d'énergie.

### III. Objectifs

---

L'objectif de ce travail consiste à proposer un scénario d'amélioration des dépenses énergétiques d'une microbrasserie dont le choix s'est porté vers la Rulles située en Belgique, plus précisément en province du Luxembourg dans le village de Rulles. Pour ce faire, nous avons opté pour l'intégration d'un système solaire thermique.

On essayera également de faire une analyse économique de ce scénario, afin de permettre au propriétaire de mettre en œuvre, s'il le souhaite, l'étude réalisée et présentée par ce travail.

Pour atteindre au mieux les objectifs visés, il est nécessaire de passer par une analyse rigoureuse de la situation actuelle de la Rulles, en passant par un audit énergétique. On pourra alors exploiter nos données récoltées et s'aider de l'outil TRNSYS afin de réaliser les simulations et modélisations nécessaires pour notre scénario d'optimisation énergétique.

## IV. Revue de littérature

---

### 1. Fabrication de la bière [21]

Le processus de fabrication d'une bière étant à la base du secteur brassicole, il est nécessaire d'effectuer un rappel de ce dernier. De plus, il est responsable pour la plus grosse part de la consommation énergétique d'une brasserie et est donc le premier poste à analyser lorsqu'on désire effectuer une optimisation. Bien qu'il existe des méthodes différentes de production d'une brasserie à l'autre, qui dépendent du type de bière souhaitée ou encore de l'équipement dont on dispose voir même de la législation, le procédé de base reste toujours le même.

La bière est constituée de plusieurs ingrédients : de l'eau (entre 90 et 95%), du malt, du houblon et des levures.[36] Le malt est une céréale (orge) dont la germination est provoquée de façon industrielle grâce à une succession d'étapes. C'est ce qu'on appelle **le maltage**. Cette opération est primordiale puisqu'elle va permettre de conditionner la céréale : hydrolyse de son enveloppe, synthèse d'amylase, aromatisation, coloration ; l'objectif principale consistant à faciliter la transformation de l'amidon qu'elle contient, en sucres. Cependant, le maltage n'est généralement pas effectué au sein de la brasserie même, ce qui explique pourquoi il n'interviendra pas dans l'étude des dépenses énergétiques d'une brasserie.

Une fois le maltage effectué, il est alors nécessaire de **concasser** les grains de malt, de sorte à obtenir une mouture. Cette opération doit s'effectuer à l'aide d'un concasseur. Il s'agit d'un moulin constitué de deux cylindres dont on peut adapter l'écartement et permettant un écrasement des grains de malt en plusieurs morceaux. L'objectif du concassage est de permettre aux enzymes lors de l'empatage, d'accéder à l'amidon contenu dans les grains.

Après le concassage, vient alors l'étape de **l'empatage**. Durant celle-ci, la mouture (malte concasser) obtenue est envoyée dans une cuve avec de l'eau chaude afin de former la maïsche. Son objectif consiste à extraire les sucres fermentescibles (maltose majoritairement) et non fermentescibles (dextrines) de l'amidon qui se trouve dans le malt, via hydrolyse enzymatique et de façon progressive (paliers de température allant généralement de 61 °C à 71°C). Cette étape dure environ 60 minutes peut varier. L'empatage est effectué dans une cuve que l'on nomme « cuve d'empatage » contenant un système d'agitation, afin de permettre de conserver une température homogène au sein de la cuve. A noter ici, qu'il existe différents moyens pour chauffer la cuve (flamme directe ou chauffage à la vapeur). Certaines brasseries utilisent également la technique du « mash-out », qui s'effectue à la fin de l'empatage, consistant à augmenter la température de la maïsche pendant 10 minutes jusqu'à une valeur comprise entre 75 °C et 78 °C, de sorte à dénaturer les enzymes et figer le profil de sucre du mout.

Au bout d'un certain temps, l'agitation est alors arrêtée. Le mout (eau sucrée), qui est mélangé à des drêches à ce moment-là (reste du malt concassé) est soit envoyé vers une cuve de filtration prévue à cet effet, ou bien, il est laissé au repos dans la cuve utilisée pour l'empatage, qui peut également servir de cuve filtre. Dans tous les cas, l'objectif sera à l'aide des drêches, de former un gâteau au fond de la cuve, qui servira de filtre. Un soutirage pourra alors être effectué au niveau du fond de la cuve, de sorte à forcer le mout à passer au travers du gâteau. C'est la phase de **filtration**. Une étape complémentaire, que l'on appelle rinçage vient alors s'ajouter à la fin de la filtration, de sorte à permettre de récupérer au maximum les sucres qui se trouvent dans

les drêches. Le mout lors de la phase filtration, se trouve généralement à une température qui tourne aux alentours de 75-78°C.[58]

Le mout, une fois filtré, est envoyé dans une autre cuve (parfois, la même que celle utilisée pour l'empatage) afin d'y être porté à ébullition (100°C). L'objectif de **l'ébullition** consiste à apporter de la qualité au produit fini. En effet, elle permet à la bière d'obtenir une belle mousse, d'avoir une certaine amertume et des arômes (via l'ajout de houblon pendant l'ébullition) mais également d'assurer la sanitation du mout (désactivation des enzymes provenant de l'empatage et destruction partielle des bactéries), de lui apporter de la couleur et de le rendre limpide. Cette étape dure généralement entre 1h et 1h30, et le taux d'évaporation (qui peut jouer un rôle important dans l'optimisation énergétique d'une brasserie) tourne généralement aux alentours de 5 à 8 % par heure. Dans certaines brasseries, on peut également retrouver une étape complémentaire, appelée whirlpool, qui permet une clarification du mout en fin de brassage et avant la période de fermentation.

Finalement, une dernière étape, et qui clôture le brassage de la bière, concerne le **refroidissement du mout**. En effet, une fois l'ébullition et la clarification (whirlpool) terminées, le mout passe alors par un échangeur de chaleur, ce qui le refroidit jusqu'à des températures adaptées pour la phase de fermentation. La température est déterminée selon le type de levure qui sera utilisé et du type de fermentation choisie. Par exemple, on distingue la fermentation basse, qui a lieu à des températures allant de 8 à 12 °C, de la fermentation haute, qui s'effectue à des températures allant de 18 °C à 23 °C. Grâce à cette opération, on peut donc récupérer de l'eau chaude (et donc de la chaleur, autrement perdue) qui servira pour le prochain brassage ou comme eau de lavage.

On peut alors entrer dans la phase de **fermentation**. Durant celle-ci, on y introduit de la levure sous forme sèche ou liquide dans le mout (ensemencement des levures) de sorte à transformer les sucres présents, en alcool et en CO<sub>2</sub>. Pour ce faire, elle s'effectue en plusieurs étapes : la phase d'adaptation durant laquelle la levure s'adapte aux conditions du mout dans lequel elles se trouvent (environ 12 heures), la phase primaire caractérisée par une forte activité des levures qui consomment alors tous les sucres fermentescibles (de 2 à 6 jours pour la fermentation haute) et la phase secondaire caractérisée par un mout faible en sucre facilement fermentescible et la présence d'une majorité de levures à l'état de dormance. La fermentation dure donc un peu près une semaine. Il peut également être intéressant de préciser qu'il s'agira ici d'une étape assez consommatrice puisque lorsque les levures digèrent les sucres, elles libèrent de l'énergie, puisqu'il s'agit ici d'une digestion exothermique. On voit alors la température augmenter naturellement, amenant à impacter l'activité des levures. Il est donc impératif d'avoir un système de refroidissement constant des cuves, afin de garder une température stable durant le temps de la fermentation.

Une fois que la phase de fermentation est terminée, le mout est alors envoyé dans des cuves de **garde**. Cette phase s'effectue à une température basse ; environ 1 °C, mais pour accélérer la décantation des levures, on peut monter jusqu'à 4 à 6 °C. L'objectif de cette étape est de faire sédimenter les levures, clarifier la bière, mais également affiner ses arômes. Il s'agit de l'étape la plus longue du process, sa durée étant d'environ 3 semaines.

Il ne reste alors plus qu'à **conditionner** la bière en fut ou en bouteilles dont les volumes dépendent des besoins. Cependant, il existe quelques opérations, qui peuvent avoir lieu avant, pendant ou après le conditionnement, afin d'obtenir le produit final désiré. Celles-ci dépendent

de la brasserie considérée. En effet, pour les microbrasseries, il est nécessaire d'effectuer une décantation après la garde et avant conditionnement, car la bière ne subira aucune filtration. La décantation ayant pour objectif de purger des levures présentes dans le mout provenant de la phase de fermentation. De plus, la garde est arrêtée un peu plus tôt, afin d'effectuer une refermentation en bouteille. Le but étant d'ajouter du sucre fermentescible avant l'embouteillage, de sorte à saturer la bière en CO<sub>2</sub>. Il faut noter que cette dernière opération requiert une chambre chaude permettant le contrôle de la température, qui doit être de 20 °C. Ce qui diffère les brasseries artisanales, par rapport aux brasseries industrielles, ce sont les phases de centrifugation et de pasteurisation qui ont lieu avant le conditionnement. En effet, les brasseries industrielles recherchent à obtenir une grande homogénéité de leur produit, ce qui les pousse à clarifier et stabiliser la bière. Les microbrasseries quant à elles, ne cherchent pas forcément à obtenir une bière limpide, et ne filtrent donc pas les bières en fin de cycle de production. Finalement, la saturation du CO<sub>2</sub> est effectuée de façon artificielle chez les industriels.

La figure suivante permet de reprendre les différents niveaux énergétiques nécessaires lors du processus de fabrication d'une bière. Les niveaux énergétiques, dont une brasserie a besoin, sont de 100 °C pour l'ébullition et environ 80 °C pour la majorité des besoins en eau chaude.

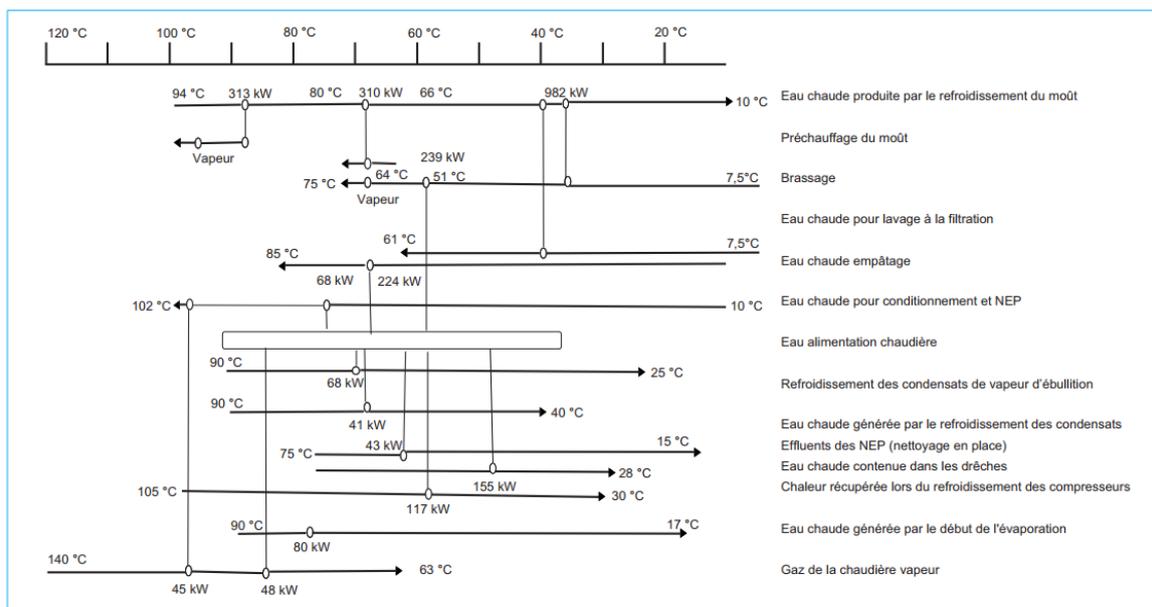


Figure 3 - Niveaux énergétiques d'une brasserie

Figure 2 : Les différents niveaux énergétiques d'une brasserie [29]

## 2. La consommation en énergie spécifique [29]

Afin d'évaluer les dépenses énergétiques dans le domaine brassicole, on se base généralement sur la consommation en énergie spécifique d'une brasserie. Celle-ci s'exprimant en mégajoule (MJ/hl) ou kilowattheure par hectolitre (kWh/hl). Elle est obtenue en divisant la quantité d'énergie utilisée pour produire un certain volume final de bière :

$$e = \frac{E}{V_{\text{bière}}}$$

Il est courant de distinguer la consommation en énergie électrique de celle en énergie thermique. On parlera alors de consommation en énergie électrique spécifique ( $e_{el}$ ) et de consommation en énergie thermique spécifique ( $e_{th}$ ).

Il est possible de retrouver des ordres de grandeur de ces consommations. Par exemple, dans un article rédigé par monsieur Franck Jolibert, retrouver sur le site « technique de l'ingénieur », on retiendra que :

- L'indicateur énergétique de performance pour la consommation en énergie thermique pourrait être de 160 MJ/hl de bière en moyenne (soit 45 kWh/hl), avec une plage allant de 80 à 360 MJ/hl (soit de 22 à 100 kWh/hl)

- L'indicateur énergétique de performance pour la consommation en énergie électrique pourrait être de 15 kWh/hl de bière, avec une plage allant de 6 à 22 kWh/hl de bière

Il existe cependant de nombreux facteurs pouvant exercer une influence sur ces valeurs. Par exemple, selon le type de bière élaboré, l'emballage utilisé ou bien s'il y a de la récupération de chaleur mise en place au sein de la brasserie.

### 3. Facteurs influençant la consommation en énergie spécifique

Bien qu'il existe des plages de valeur dans la littérature concernant la consommation en énergie spécifique d'une brasserie, celle-ci dépendra fortement de ses circonstances particulières. En effet, il existe plusieurs facteurs pouvant exercer une influence sur la quantité d'énergie, d'eau ou de matière première nécessaire à la production. Un des principaux étant la **capacité de production** de la brasserie, autrement dit sa taille. En effet, les grosses brasseries sont généralement plus efficaces sur le plan énergétique.

Une étude, réalisée par A. Pino et al., au sein de deux brasseries de taille totalement différente, a permis de conclure qu'une microbrasserie consommait en moyenne 4,7 fois plus d'énergie qu'une grosse brasserie industrielle. Le tableau ci-dessous permet de reprendre des valeurs des consommations en énergie spécifique déclarées par certaines entreprises brassicoles et dans lequel on voit également apparaître les résultats de l'étude :

**Table 1**  
Specific thermal energy and electricity consumption in breweries.

Brewery	Thermal energy, MJ/hL	Electricity, MJ/hL	Total energy, MJ/hL	Year of data	Reference
AB InBev group breweries	-	-	97.7	2021	[12]
Large brewery in Seville, Spain (+4,200,000 hL/year)	52.6	26.1	78.7	2019	Direct contact
Carlsberg group breweries	60.5	25.6	86	2021	[13]
Large German breweries	85-120	27-41.4	100-160	2011	[14]
Breweries of all sizes in the US	117-135	37-68	154-203	2018	[15]
Breweries associated to the British Beer and Pub Association (average)	-	-	160	2018	[16]
			270	1990	
Medium-size brewery in the UK (250,000 hL/year)	160-180	45 - 60	205-240	2012	[5]
Sai Gon Beer, Vietnam (200,000 hL/year)	144	64.8	208.8	2011	[17]
Polish breweries (average)	97-194.4	29-43.2	126-238	2015	[18]
Small brewery in Latvia (17,000 hL/year)	219.2	81.2	300.4	2013	[19]
Microbrewery in California (12,000 hL/year)	160	420	580	2018	[20]
Microbrewery in Andalusia, Spain (200 hL/year)	-	-	369	2019	Direct contact
Microbrewery in Bloemfontein, South Africa (424 hL/year)	-	-	234	2019	[21]

Tableau 1 : Consommation en énergie spécifique thermique et électrique de brasseries de tailles différentes

On peut constater, à l'aide de ce tableau, que les résultats obtenus correspondent à une consommation spécifique en énergie pour la brasserie industrielle de 78,7 MJ/hl alors que celle de la microbrasserie, qui se situe dans la même région (Andalousie) en Espagne à plus ou moins 80 km de distance, c'est-à-dire selon des conditions climatiques quasi-identiques, est égale à 369 MJ/hl. On retrouve donc bien une consommation en énergie pour la microbrasserie, qui est 4,7 fois plus élevée que la brasserie industrielle. Lorsqu'on compare ces valeurs avec celles provenant d'autres brasseries, on peut constater que plus la brasserie a une capacité élevée de production, moins sa consommation en énergie spécifique sera élevée, ce qui va dans le sens des résultats tirés de l'étude.

Un autre facteur pouvant influencer la consommation énergétique d'une brasserie, concerne le **type de bière produite**. En effet, il existe différents types de bières, pouvant avoir des besoins énergétiques très différents. Par exemple, les lagers, qui désignent les bières à fermentation basses (entre 4 et 13 °C), consomment moins d'électricité que les ales, désignant les bières à fermentation haute (entre 16 et 24 °C). En plus de la fermentation, la quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer une bière dépend fortement d'autres facteurs tel que le temps de la fermentation et du stockage, s'il y a pasteurisation ou non, s'il s'agit d'une bière à faible ou forte densité.

Finalement, un dernier facteur exerçant une influence sur la consommation est le **type d'emballage** utilisé. C'est-à-dire que l'emballage dans des bouteilles consignées, consomme près de 3 fois plus de carburant et d'électricité pour 1 hectolitre de bière qu'il n'en faut pour un conditionnement de cette même quantité, en fut. En effet, il faut plus ou moins 50 MJ d'énergie pour le conditionnement dans un fut de 50 litres (soit 2 MJ/hl) alors qu'il faut entre 38 et 50 kJ d'énergie pour une bouteille de 33 cl (soit 13,3 MJ/hl).

#### 4. Pourquoi y'a-t-il une efficacité énergétique moindre dans les microbrasseries ?

Comme nous venons de le voir, la capacité de production d'une brasserie est un des facteurs ayant le plus d'influence sur sa consommation énergétique. En effet, les microbrasseries ont tendance à consommer plus d'énergie et d'eau que les brasseries industrielles et ce, pour plusieurs raisons. Il est donc intéressant de les mentionner, car elles vont permettre d'ajouter du sens à l'objectif de ce travail.

Le besoin de réduire la consommation en énergie et en ressources naturelles a fait apparaître dans l'industrie, et notamment dans les brasseries, une amélioration considérable au niveau des technologies utilisées pour le brassage de la bière. De plus, on a constaté que ces techniques étaient surtout utilisées au sein des grosses brasseries industrielles afin de garantir leur compétitivité sur le marché en réduisant leur coût de production. Cependant, dans les petites et moyennes entreprises, les conditions sont un peu différentes. En effet, elles ont généralement

plus de liberté au niveau du prix de vente puisqu'elles n'appartiennent pas au marché de masse, leur permettant alors de vendre la bière à des prix plus élevés. On a également constaté que les consommateurs étaient prêts à acheter la bière à des prix plus élevés, si celle-ci est dotée d'une haute qualité et brassée de façon traditionnelle et localement. Il s'agit donc ici d'une première raison basée sur l'économie d'échelle qui pousse les plus grosses brasseries à évoluer selon un rythme différent des microbrasseries.

On peut également observer, chez les vieilles brasseries existantes depuis plusieurs années, qu'elles se sont agrandies au cours du temps et ce, généralement via des extensions improvisées de bâtiments existants. On voit donc des sites de productions fragmentés en plusieurs morceaux, avec des niveaux d'isolations parfois très différents, compliquant ainsi les mesures visant à améliorer les dépenses énergétiques de la brasserie. Au niveau de l'équipement, on constate également qu'il y a souvent des anciennes technologies de productions au sein de ce type de brasseries, qui pour des raisons de coût d'investissement ou bien parce qu'elles permettent toujours de fournir l'objectif visé par son utilisation, ne sont pas remplacées. En effet, les microbrasseries hésitent souvent à faire des investissements sur le long terme, en raison des risques du marché, ou bien parce qu'elles n'ont pas le budget nécessaire pour ce genre d'investissement.

Finalement, l'opinion des brasseurs artisanaux joue un rôle important dans la prise de décision. En effet, ils veulent généralement rester sur une production traditionnelle de la bière, car il s'agit d'un de leur argument marketing fort. De plus, ils n'osent pas passer le cap des nouvelles technologies car elles pourraient altérer la saveur de la bière. On peut également constater qu'au niveau de l'automatisation du processus de production, celui n'est généralement pas automatisé au sein des microbrasseries ou on se base alors plutôt sur les connaissances du brasseur et de ses employés.

Des progrès ont tout de même fait surface au cours des années 2010, lorsque de nombreuses études ont été menées concernant l'application de stratégies d'intégration de l'énergie solaire thermique et de récupération de chaleur. Cependant, elles ne concernent encore que trop peu les microbrasseries, qui étant très nombreuses demandent généralement des solutions qui sont personnalisées, permettant de répondre à leurs besoins spécifiques. De plus, les solutions permettant la récupération de la chaleur sont généralement plus difficiles à mettre en place, car leur processus de production est discontinu. Par conséquent, elles demandent de réfléchir également à l'installation d'un système de stockage, ce qui augmentant alors l'investissement.

## 5. L'énergie solaire thermique

L'intégration de l'énergie solaire à une microbrasserie peut être un bon moyen afin de concilier intérêt économique et environnementale. En effet, si on désire atteindre les objectifs de décarbonation visés par l'union Européenne, il est primordial de passer par l'utilisation des énergies renouvelables. De plus, les microbrasseries sont connues pour leur utilisation en produits de haute qualité et leur petit volume de production, les rendant moins compétitif sur le marché. L'intégration du solaire peut donc être un bon moyen afin de réduire les coûts d'une microbrasserie, permettant aux brasseries de devenir plus compétitives.

Sachant qu'une majorité de la consommation énergétique d'une brasserie est due aux besoins en chaleur mais également que le processus de fabrication d'une bière demande d'atteindre des niveaux énergétiques assez faibles, le secteur brassicole a un potentiel élevé d'intégration de l'énergie solaire thermique.

Le présent point a pour objectif d'effectuer une piqure de rappel de la théorie relative aux systèmes solaires thermiques, qui servira alors de base pour notre étude.

### *a. Le rayonnement solaire*

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il résulte du processus de fusion de l'hydrogène qui le constitue. Une partie de ce rayonnement atteint quotidiennement la terre et constitue une source d'énergie considérable et surtout, inépuisable. L'intensité du rayonnement solaire varie suivant la localisation géographique, les rythmes journaliers et saisonniers. On distingue différents types de rayonnement :

- Le rayonnement global, qui correspond au rayonnement total reçu par une surface d'un mètre carré (Exprimé en  $W/m^2$ ). Il est obtenu en additionnant le rayonnement direct, diffus et réfléchi.
- Le rayonnement diffus, qui est le rayonnement émit par l'ensemble de l'atmosphère, et qui dépend donc directement de sa composition
- Le rayonnement direct, qui varie en fonction de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et qui, comme son nom l'indique, correspond au rayonnement arrivant directement sur une surface. (Sans subir de réflexion ou d'absorption via l'atmosphère)
- Le rayonnement réfléchi quant à lui, correspond au rayonnement réfléchi par le sol. Il porte également le nom « albédo ».

Ainsi, même dans des zones faiblement ensoleillées, comme en Europe du Nord par exemple, l'énergie solaire n'est pas négligeable. Par exemple, en Belgique, une surface d'un mètre carré reçoit sur une année une quantité d'énergie située entre 800 et 1100 kWh/m<sup>2</sup> par an, ce qui correspond à l'équivalent de 100 litres de fuel par m<sup>2</sup> et par an.

### *b. Installation solaire thermique : principe de fonctionnement*

Le principe de base d'une installation solaire thermique consiste à capter les rayons du soleil afin de permettre :

- La production d'eau chaude sanitaire
- Le chauffage du bâtiment
- La production d'électricité (via une centrale solaire thermodynamique)
- La production de chaleur pour les processus industriels
- La production de froid

Pour ce faire, on utilise des capteurs composés de tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur (généralement, il s'agit d'un mélange eau-antigel glycol). Ainsi, lorsque les rayons solaires sont suffisants, des circulateurs s'enclenchent, permettant au fluide caloporteur d'acheminer, lors de son passage au travers des capteurs, l'énergie solaire transférée via

l'absorbeur. L'absorbeur correspond à un corps noir présentant des propriétés particulières (faible émissivité et forte absorption) Ce dernier va alors circuler jusqu'à un ballon de stockage, ou l'énergie sera libérée et transférée à de l'eau froide (correspondant à l'eau de distribution), via un échangeur de chaleur. Un chauffage d'appoint tel qu'une chaudière fossile ou bien à l'aide une résistance électrique sont généralement requis pour ce type d'installations. L'eau, une fois à bonne température, est alors dirigée vers les différents points de puisage via la boucle de distribution. Un dispositif de régulation électronique permet de commander le système (circulateurs et appoints) en fonction des conditions d'ensoleillement mais également de la demande en eau chaude.

### c. Types de capteurs

On distingue deux grandes familles de capteurs : les capteurs à tubes et les capteurs plans

#### **Capteurs plans**

Il existe différents types de capteurs plans sur le marché. En effet, on retrouve des capteurs plans opaques et des capteurs plans vitrés.

Les capteurs plans non-vitré (ou opaque) aussi appelé « moquette » sont les capteurs les plus simples du marché. Ils sont constitués d'un ensemble de tuyaux opaques généralement fabriqué en PVC noir et souple, sans cadre ni vitrage. Ces tuyaux permettent ainsi de jouer un double rôle (voir figure 3) : celui de plaque absorbante (1) et celui de tuyauterie dans lequel peut circuler le fluide caloporteur (2).



Figure 3 : Vue horizontale d'un capteur plan opaque [9]

Ne possédant ni isolation, ni couverture vitrée, ce type de capteur est particulièrement sensible à la température de l'air, ce qui fait qu'ils ont un rendement globalement moins bon, sauf s'ils sont utilisés pendant la période estivale et à basse température. On les rencontre donc surtout pour des applications à faible température tel que le chauffage des piscines par exemple. Le fait qu'il n'y ai pas de protection amène également un autre désavantage : ils résistent moins bien dans le temps. Cependant, leur simplicité de conception fait de ces capteurs, des produits très bon marché.

Le second type de capteurs plans existant sur le marché, sont les capteurs plans vitrés. Il s'agit ici du type de capteur le plus retrouvé dans les installations existantes car ils sont généralement bien adaptés pour la plupart des applications courantes, comme la production d'eau chaude sanitaire et comme appoint de chauffage des bâtiments (température d'eau chaude entre 30°C et 60°C). De plus, ils ont généralement de meilleurs rendements que les capteurs opaques.

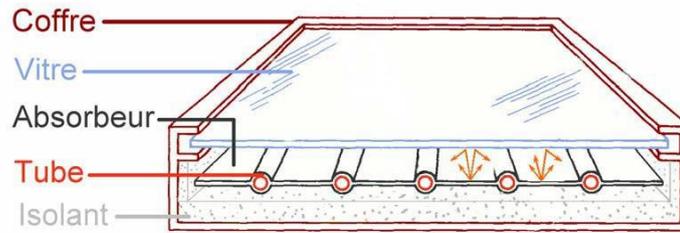


Figure 4 : Schéma d'un capteur plan vitré [11]

Ce type de capteur est constitué de :

- D'un cadre et d'un vitrage formant ainsi un boîtier contenant les éléments constitutifs du capteur tel que les tubes, la plaque absorbante.... La vitre a un double intérêt ; premièrement, elle permet de garder enfermés les rayons infrarouges qui ont pénétrés à travers la vitre (via le choix d'une vitre trempée solaire, présentant une faible teneur en fer pour permettre un haut degré de transmission lumineuse) provoquant ainsi un effet de serre artificiel au niveau de la cavité. Deuxièmement, la vitre permet de protéger le panneau des intempéries.
- De joints, permettant d'étanchéifier le cadre et ainsi renforcer la protection face aux intempéries.
- D'une isolation thermique située tout autour de l'absorbeur afin de minimiser les pertes de chaleur au travers des parois externes du panneau.
- D'une plaque absorbante métallique (généralement cuivre, aluminium ou acier), convertissant les rayons solaires en énergie thermique.
- De tubes traversés par le fluide caloporteur afin d'évacuer la chaleur jusqu'à l'extérieur du capteur.

Selon le modèle, il existe différents types de réseaux hydrauliques internes au capteur, comme l'illustre la figure 5 ci-dessous :

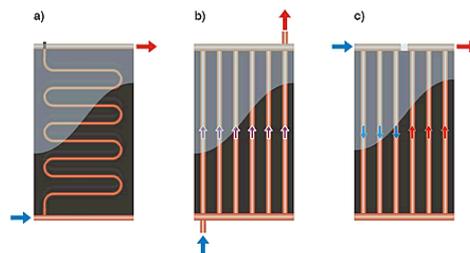


Figure 5 : Types de réseaux hydrauliques [8]

### Capteurs à tubes (sous vide)

Ce type de capteurs est composé de tubes en verre sous vide d'une longueur approximative de 2 m et d'un diamètre de 10 cm, placés les uns à côté des autres, et à l'intérieur desquels se trouvent d'autres tubes permettant la circulation du fluide caloporteur. Le vide permet de fournir une très bonne isolation à ce type de panneaux. On peut classer les capteurs à tubes sous vide en deux grandes familles, qui se distinguent par la façon dont est positionné l'absorbeur : soit il est positionné directement sur le verre ou bien il est positionné sur une ailette en cuivre.

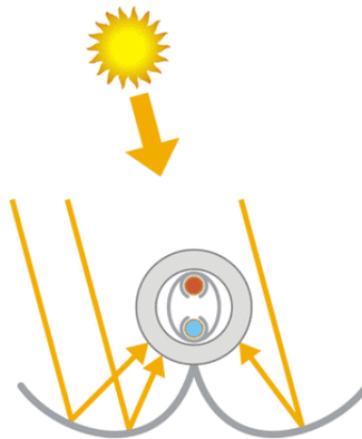
Pour les capteurs avec ailette en cuivre, l'absorbeur est déposé sur une structure en cuivre qui est placée dans le tube en verre et qui possède une meilleure sélectivité (et donc un rendement

optique supérieur) que celui déposé directement sur le verre. En ce qui concerne le vide, il est effectué à l'intérieur des tubes en verre, l'espace où se trouve l'ailette en cuivre. On peut également trouver d'autres types de capteurs selon la nature du fluide caloporteur et son mode de circulation. (À circulation directe ou à caloduc). Le gros avantage de ce type de capteurs est qu'il est possible d'orienter l'absorbeur différemment par rapport à la façon dont il est positionné sur son support. (Par exemple, lors de la mise en place de panneaux en façade).

En ce qui concerne les capteurs avec absorbeur positionné directement sur le verre, le vide est effectué entre les deux couches de verre, de la même façon qu'un thermostat. Il est également possible d'introduire des réflecteurs de sorte à augmenter la part des rayons incidents dirigés vers les capteurs. Dans ce cas on parlera de tubes CPC (Compound Parabolic Concentrator)

Ainsi, les capteurs à tubes sous vide auront tendance à être utilisés plutôt pour le chauffage, la climatisation par ad/absorption ou d'autres process plus particuliers. En effet, ils sont plutôt adaptés pour des températures plus hautes car ils ont un rendement optique plus faible et une meilleure isolation que les capteurs plans.

*Composition des tubes sous vide avec absorbeur sur support en verre*



1. Une bouteille de verre à double paroi est employée. Les deux parois sont reliées de manière étanche au niveau du goulot de manière à emprisonner le vide (partie grise dans le schéma).
2. Sa surface externe (2) est laissée transparente.
3. Un absorbeur est posé sur la face intérieure de la bouteille.
4. Des tubes qui évacuent la chaleur sont placés dans le creux atmosphérique central.
5. Des tuyaux sont reliés à l'absorbeur par des profils semi-circulaires métalliques de transfert de chaleur.
6. Éventuellement et préférablement, des réflecteurs augmentent le rayonnement solaire sur le capteur (on parle alors de tubes CPC pour Compound Parabolic Concentrator).

*Figure 6 : Composition des tubes sous vide [8]*

d. Rendement d'un capteur solaire thermique [54]

Le rendement d'un capteur solaire (voir figure 7) est obtenu en divisant la quantité de chaleur utile transmise au fluide caloporteur ( $Q_3$ ) par le rayonnement solaire incident ( $E_0$ ) :

$$n = \frac{Q_3}{E_0}$$

La figure ci-dessous permet de schématiser le rendement d'un capteur solaire thermique :

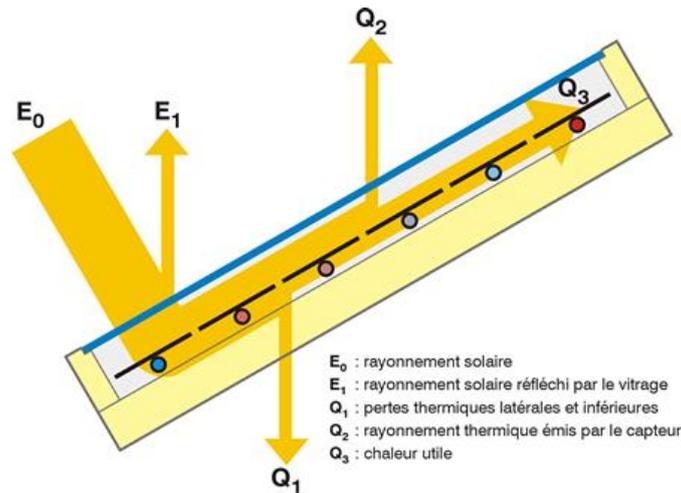


Figure 7 : Rendement d'un capteur solaire thermique

La chaleur utile fournie par le capteur est obtenue en effectuant la soustraction des pertes thermiques au rayonnement solaire incident. Les pertes thermiques sont dues à la réflexion du vitrage ( $E_1$ ), à la conduction au dos du capteur ( $Q_1$ ) mais également à la convection due à l'air environnant ( $Q_2$ ). On peut donc déterminer la quantité de chaleur utile fournie par un capteur solaire via l'équation suivante :

$$Q_3 = E_0 - E_1 - Q_2 - Q_1 \text{ (MJ)}$$

Les déperditions thermiques ( $Q_1$  et  $Q_2$ ) dépendent directement de l'isolation du capteur alors que les apports solaires utiles ( $E_0$  et  $E_1$ ), c'est-à-dire la quantité de chaleur réellement absorbée par le capteur, dépend directement de ses propriétés optiques, à savoir la sélectivité de l'absorbeur (absorptivité) et le type de verre (transmission du vitrage). On peut donc exprimer le rendement d'un capteur de la façon suivante :

$$n = \beta \cdot -K \frac{\Delta T}{E_0}$$

Avec,

$\beta$  = facteur optique du capteur. Il est obtenu en effectuant le produit du facteur de transmission du vitrage ( $\tau$ ) par le coefficient d'absorption de l'absorbeur ( $\alpha$ ). Il se trouve généralement entre

0.5 et 0.8 et représente donc le rendement maximal du capteur (facteur optique le plus grand possible recherché).

$K$  = coefficient de déperdition thermique du capteur ( $W/m^2K$ )

$\Delta T$  = Différence entre la température moyenne du fluide caloporteur du capteur et la température extérieure (ambiante au capteur)

Le facteur  $K$  varie en fonction du type de capteur utilisé. Plus le  $K$  sera faible, plus l'isolation thermique sera importante. Les plages de valeur correspondant pour chaque type de capteur solaire thermique sont reprises dans le tableau suivant :

Type de capteur	Valeur du coefficient K
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

Tableau 2 : Facteur K en fonction du type de capteur

Comme nous l'avons vu lors de la description des différents capteurs, il existe plusieurs applications possibles pour l'utilisation de capteurs solaires, et le choix du capteur pour une application donnée dépend de la plage de température de fonctionnement. La figure ci-dessous permet d'illustrer cela.

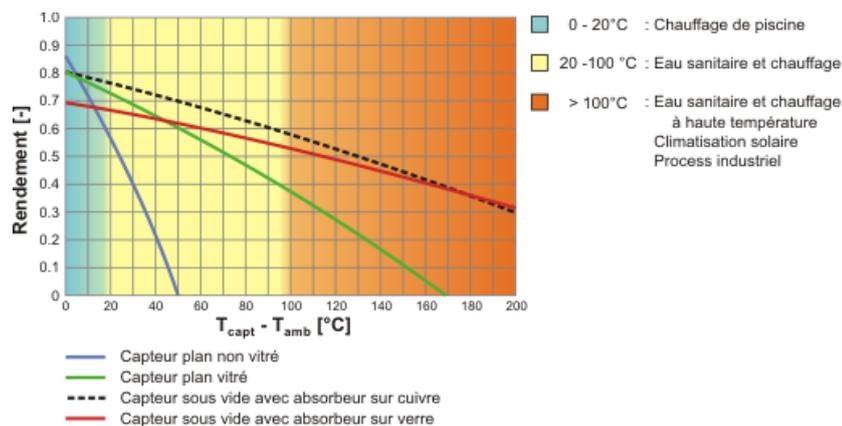


Figure 8 : Evolution du rendement des capteurs solaires thermiques en fonction de la différence de température entre le capteur et la température ambiante (°C) [8]

Par exemple, on peut constater que les capteurs plans non vitrés sont particulièrement adaptés pour le chauffage des piscines. En effet, on constate que le rendement est particulièrement élevé à des plages de régime de travail basse température (entre 0°C et 20°C) mais leur rendement

chute brutalement lorsque les plages de régime augmentent. Ainsi, à ces plages de régime de travail, les déperditions thermiques ont peu d'influence et c'est le rendement optique qui aura de l'influence. Pour des régimes de température moyenne (entre 20°C et 100°C) qui correspondent à des applications tel que le chauffage à moyenne et basse température et la production d'eau chaude sanitaire, ce sont plutôt les capteurs à tube sous vide ou les capteurs plan vitrés qui seront choisis. Ici, les températures étant plus élevées, les déperditions thermiques commencent à prendre le pas sur le rendement optique, demandant alors une bonne isolation thermique. Finalement, pour les régimes haute température correspondant ici à des applications comme des process industriels, du chauffage à haute température ou encore de la climatisation solaire, c'est surtout l'efficacité de l'isolation qui va déterminer la performance des capteurs. Ainsi, les seuls capteurs possibles dans ce cas sont les capteurs sous vide.

#### e. Rendement d'une installation

Le rendement d'une installation solaire thermique ne dépend pas seulement du rendement des capteurs solaires. En effet, en plus du rendement optique et des pertes thermiques des capteurs, il existe des pertes lors du stockage de l'eau chaude et lors du transfert des fluides. Ces déperditions vont dépendre directement de la longueur et la section des tuyaux mais également de leur isolation. Ainsi, le rendement d'une installation tourne généralement entre 30 et 40%. [15] En Belgique, l'irradiation globale tournant aux alentours de 1000 kWh/m<sup>2</sup>an, l'énergie captée sera alors de 300 à 400 kWh/m<sup>2</sup>an soit l'équivalent de 30 à 40 litres de fuel par m<sup>2</sup> de capteur.

#### f. Fraction solaire

La fraction solaire est définie comme étant la part de l'eau chaude sanitaire qu'on souhaite produire par notre installation solaire thermique. En effet, il s'avère que le choix de la fraction solaire a une influence direct sur le rendement global annuel d'une installation, car elle impacte directement le taux d'utilisation des panneaux. Ce phénomène est illustré par la figure ci-dessous.

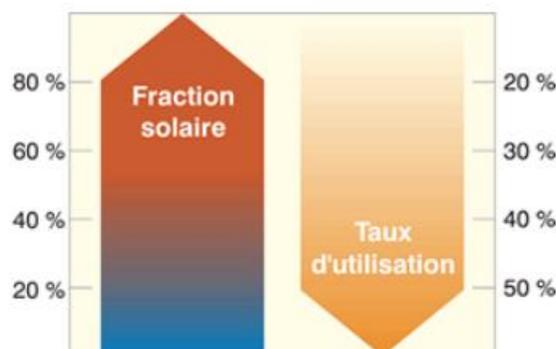


Figure 9 : relation entre la fraction solaire et le taux d'utilisation

Ainsi, si on décide de dimensionner notre installation afin qu'elle fournisse de l'eau chaude pour les jours où il y a peu de soleil, les surfaces nécessaires seront importantes. Cependant, en été, lorsque le soleil est fort présent, cette surface peut devenir trop importante pour les besoins de chaleur nécessaires amenant alors à un surdimensionnement. En effet, une surface plus importante de panneaux amènera à une production plus rapide de l'eau à la température désirée, coupant ainsi les capteurs plus rapidement et donc amenant à une réduction du taux d'utilisation. Cette réduction se traduira également par une baisse de la production surfacique (KWh/m<sup>2</sup>) puisque les pertes thermiques seront plus importantes et il y aura un taux de fonctionnement à haute température plus important.

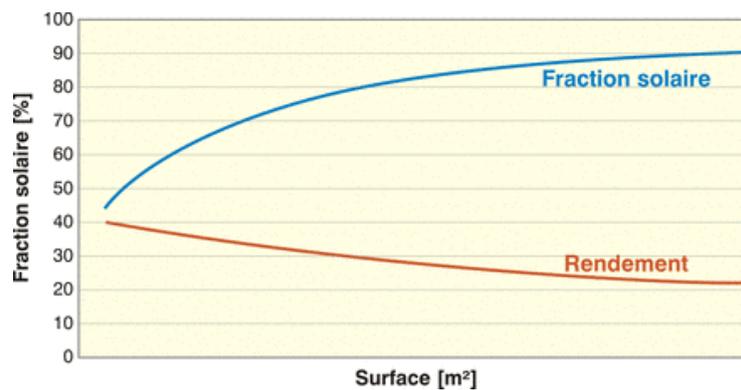


Figure 10 : Superficie de capteurs nécessaire en fonction de la fraction solaire et rendement correspondant [52]

La figure ci-dessus permet de résumer le phénomène. Il s'agit du graphique mettant en relation la superficie de capteurs nécessaire par rapport à la fraction solaire et le rendement correspondant. On constate que la relation entre la surface de panneaux et leur productivité n'est pas linéaire. Ainsi, plus la fraction solaire sera grande, plus le rendement de l'installation sera faible. Il est donc nécessaire de trouver le dimensionnement optimal permettant de faire un compromis entre la fraction solaire et le rendement de production solaire.

## V. Matériels et méthodes :

---

Cette section va permettre de décrire les méthodes utilisées dans le but d'atteindre les objectifs de ce travail. C'est-à-dire qu'ici, nous allons reprendre les grandes étapes de simulation effectuées via TRNSYS, les méthodes de calcul utilisées, que ce soit pour la demande en énergie de la brasserie ou bien pour effectuer notre étude économique mais également les hypothèses permettant de résoudre ces calculs.

### 1. Matériel

Pour permettre de réaliser au mieux la suite, un certain nombre d'outils sont nécessaires. Pour commencer, un logiciel de simulation a été sélectionné. Etant donné que j'ai reçu des séances de travaux pratiques durant mes études sur TRNSYS et qu'une partie des professeurs de l'université et notamment les membres de l'équipe de recherche BEMS possèdent déjà une certaine maîtrise de ce logiciel, le choix s'est porté sur celui-ci.

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique du bâtiment et des systèmes, qui a été développé en partie par le CSTB (centre scientifique et technique du bâtiment). Il permet ainsi la simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment via l'intégration des caractéristiques de ce bâtiment (emplacement, matériaux de construction, architecture globale, concept énergétique...) et des systèmes (chauffage, climatisation, énergies renouvelables, ...). Pour y parvenir, le logiciel comprend des centaines de composants standards intégrés dans une bibliothèque, que l'on appelle « types ». De plus, il s'agit d'un outil très flexible puisqu'il permet d'ajouter facilement de nouveaux composants, systèmes voire des concepts énergétiques. [16]

En plus de ce logiciel, j'ai eu en ma possession différents documents fournis par le propriétaire de la brasserie ; les plans de l'architecture, les consommations annuelles en électricité et en gaz, le fonctionnement du processus de fabrication, les horaires de brassage mais également les volumes mis en jeux, ...

### 2. Méthodes

Afin de parvenir à nos objectifs, une méthodologie de travail a été mise en place. Celle-ci est basée sur celle utilisée lors de la réalisation d'un audit énergétique. C'est pourquoi, il est intéressant de rappeler son principe.

Un audit énergétique est un processus d'évaluation de la consommation énergétique d'un bâtiment ou d'une installation industrielle. Il consiste à comprendre la façon dont se répartissent les consommations au sein d'un site mais également d'analyser les actions pouvant être entreprises afin d'améliorer/réduire les dépenses énergétiques en passant par le chiffrage des

gains économiques et énergétiques apportés par ces actions. Il comprendra donc plusieurs enjeux<sup>1</sup> :

-Réduction des coûts énergétiques : Il s'agit généralement de l'objectif principal pour l'entreprise. C'est-à-dire réduire les coûts liés aux dépenses énergétiques grâce à l'identification des sources de gaspillage et en proposant des solutions pour les éliminer.

-Amélioration du confort ou du process : En effet, en analysant et améliorant l'efficacité énergétique, on peut améliorer le confort des occupants puisqu'on agit sur la qualité de l'air, visuelle, le confort thermique, ... Il en est de même pour la qualité d'un process.

-Contribution à la protection de l'environnement : L'audit énergétique permet en premier lieu de faire des économies, mais a pour conséquence positive de contribuer à la réduction des consommations énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et donc contribue à protéger notre environnement en réduisant l'impact de l'homme sur la planète.

Les étapes permettant la réalisation d'une audit énergétique sont reprises ci-dessous :

- 1) Contact préliminaire : On établit une offre commerciale (dans notre cas, il n'y a pas d'offre commerciale, simplement une demande d'autorisation) calibrée sur les besoins réels du client (contexte et objectifs du mémoire, besoins et attentes du propriétaire de la Rulles, contraintes réglementaires en Wallonie, ...). C'est donc ici que nous déterminerons le périmètre de notre travail, ainsi que les variables qu'il faudra prendre en compte dans ce périmètre.
- 2) Réunion de démarrage : Désigner l'interlocuteur responsable de l'audit (en revanche ici il s'agit de moi-même), facilite la coopération des services, signale les conditions de l'audit : ressources et données à fournir, accords de confidentialité, planning prévisionnel des étapes... Il s'agit donc de la mise en place d'un plan pour le mémoire, de la prise de contact avec les différents interlocuteurs (brasseur, promoteur, ...) pour obtenir les ressources et les données nécessaires. En d'autres mots, c'est la phase d'organisation pour permettre d'atteindre les objectifs visés lors de l'élaboration du périmètre.
- 3) Recueil des données : L'objectif est de réaliser un inventaire des données, équipements consommateurs et caractéristiques détaillées, données historiques, documents de conception/maintenance, études antérieures, données économiquement pertinentes, ...En résumé, il s'agit de l'état des lieux de la brasserie.
- 4) Travail sur place : Dans certains cas, il est nécessaire d'effectuer des mesures sur place afin d'évaluer les usages énergétiques, le comportement des usagers, domaines/procédés nécessitant plus de données.
- 5) Analyse : Il s'agit ici d'effectuer une analyse approfondie des données recueillies, en utilisant différents outils (par exemple, TRNSYS). Elle va permettre de créer la base à partir de laquelle on pourra fournir un plan d'action visant à améliorer l'efficacité énergétique de la brasserie.

---

<sup>1</sup> « Réalisation audit énergétique Industrie et Tertiaire | ACSIO Energie ». Consulté le 18 novembre 2023.  
<https://www.acsio-energie.com/audit-energetique>.

- 6) Rapport : Le rapport correspond au mémoire en tant que tel. Il reprend tout le travail du dessus : objectifs, de la théorie si nécessaire, un état des lieux de la brasserie, les simulations, les résultats de ces simulations, ...
- 7) Réunion de clôture : Comme vous l'avez compris, il ne s'agit pas ici d'une réunion à proprement parlé, mais plutôt de la remise du mémoire ainsi que la défense des résultats obtenus.

La suite de cette section, commencera donc par la 3<sup>ème</sup> étape de la réalisation d'un audit énergétique. Tout d'abord, Elle va permettre de faire l'inventaire des données récoltées par suite de l'état des lieux de la brasserie. Et par la suite, d'expliquer les différentes méthodes utilisées afin d'exploiter les données recueillies et de parvenir à nos objectifs. Elle reprendra également les hypothèses qui ont été effectuées afin d'obtenir nos résultats.

#### a. Etat des lieux de la brasserie

##### **Son histoire**

Avant de rentrer un peu plus dans les détails, il peut être intéressant de passer en revue l'histoire de la brasserie. En effet, elle va permettre au lecteur de le mettre en contexte quant à l'état actuel de sa configuration.

La brasserie de Rulles a vu le jour durant l'année 1999, lorsqu'un ingénieur agronome spécialisé en brasserie-malterie dénommé Gregory Verhelst et originaire de Tournai a décidé de s'installer dans une vieille ferme du village se situant en Belgique et plus précisément en province du Luxembourg, dans un petit village appelé Rulles (Habay). C'est par passion qu'il décida de créer ses propres bières, à son goût. Il a d'ailleurs eu raison puisque dès les débuts du lancement de la brasserie, il fut salué par Michael Jackson, connu sous le nom du « beer hunter » pour « chasseur de bières », qui est devenu une légende peu à peu, dans le milieu brassicole mais également pour le whisky.

La toute première transformation de bière fut la Rulles blonde, produit phare de la brasserie, créée en 2000. Elle était brassée dans une cuve de 10 hl et était conditionnée en bouteille de 75 cl. L'année qui suivit, Grégory décida alors de créer une nouvelle recette de bière, la Rulles brune. Se succéda ensuite une série de nouvelles bières, toutes aussi délicieuses les unes que les autres. On notera notamment la Rulles triple créée en 2003, la Rulles estivale créée en 2004, la Rulles épeautre créée en 2005 et la Rulles grande 10 créée en 2010 pour fêter les 10 ans de la brasserie. Le volume de fabrication a alors augmenté peu à peu et en 2006, la brasserie s'équipa alors d'une cuve de brassage de 30 hl, de cuves à fermentation ouvertes et d'une embouteilleuse semi-automatique afin d'atteindre un volume de production de 911 hl cette année-là. En 2012, la brasserie vit de nouveaux travaux d'agrandissement (les premiers datant de 2004, avec la création d'un hangar destinée au stockage et à la production) l'amenant à atteindre un potentiel de production annuel de 6000 hectolitres par an. En 2013, le volume annuel de production atteint 2675 hectolitres et 60% de la production est exportée. Durant les années qui vont suivre, plusieurs nouvelles bières vont apparaître, notamment la Rulles pils et houblon sauvage en 2015 suivit de la Rulles pils impériale en 2018 et de la Rulles Holly Hop Circus en 2019 (sans compter les diverses associations comme par exemple, celle faite avec la brasserie de Silly, qui amena la brasserie à créer la Cré-tonnerre en 2016). A l'heure d'aujourd'hui, la brasserie à

atteint une production annuelle de 4000 hectolitres par an et possède une grande variété (une dizaine) de bières, conditionnées en bouteilles de 33 cl, de 75 cl ou en futs de 20 litres.

### Son Architecture

Au travers de l'histoire, il est ainsi possible de distinguer 3 dates clefs dans l'évolution architecturale de la brasserie, qui permettent de la subdiviser en 3 parties. Elles se distinguent notamment par leur usage, le type de matériaux utilisés, le niveau d'isolation et bien évidemment, leur année de construction. Un screen provenant de google map permet de mettre en évidence cela :

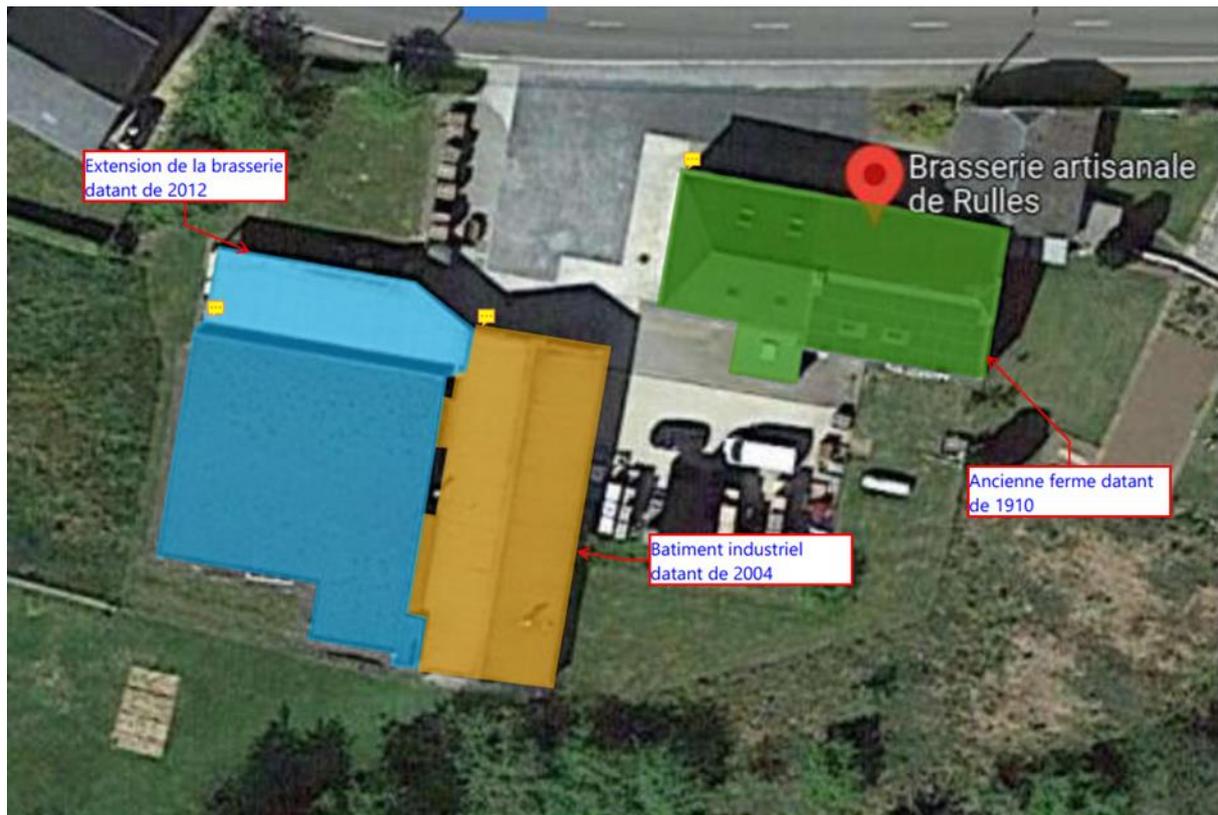


Figure 11: Brasserie de Rulles vue de haut (google map)

On retrouve donc sur cette image :

-La ferme du village : Il s'agit ici de la partie la plus ancienne de la brasserie, datant de 1910. Anciennement utilisée en tant qu'habitation et également, comme son nom l'indique, de ferme du village, elle sert actuellement pour le secrétariat, les bureaux administratifs, les dégustations mais également pour le stockage. C'est pourquoi, pour la suite du travail, nous emploierons plutôt le terme « bâtiment administratif » pour désigner cette partie de la brasserie. De plus, elle a pour particularité d'avoir une architecture de type vernaculaire (COZEB). C'est-à-dire qu'elle a été conçue en adéquation avec le territoire dans lequel elle se trouve, composée de matériaux propre à sa région et en adéquation avec ses habitants. Ainsi, le bâtiment est composé de murs de schistes épais et pleins (environ 50 cm) avec une isolation très faible.

- « Le bâtiment industriel » crée en 2004 par suite de travaux d'agrandissement. Ce bâtiment est constitué majoritairement par des gros blocs d'Argex dont l'isolation est faible. Son

utilisation est destinée au brassage de la bière, mais également pour l'embouteillage et le stockage du malt.

-Finalement, en 2012, des nouveaux travaux d'agrandissement ont amené à la création d'une extension du bâtiment industriel, permettant à la brasserie d'augmenter sa capacité de production annuelle à 6000 hl. Sa particularité architecturale est qu'elle a été totalement construite à l'aide de prémurs avec une isolation de 10 cm et ne possédant aucune fenêtre. De plus, elle possède un toit végétalisé. Au niveau de son utilisation, celle-ci est destinée majoritairement au stockage de produits finis, mais également à la phase de fermentation de la bière, pour la phase de garde et l'étiquetage des bouteilles. Le bâtiment contient également une salle conditionnée (chambre chaude) à 21°C ainsi qu'une chambre froide.

### Sources de consommation de chaleur au sein de la microbrasserie

On distingue au sein de la brasserie différents besoins en chaleur pour :

- Produire de l'eau chaude alimentaire, qui sera destinée à la production des brassins.
- Produire de l'eau chaude de chauffage utilisée par la chambre chaude et le bâtiment administratif mais également afin de produire l'eau chaude sanitaire de l'ensemble du site.
- Produire de l'eau chaude sanitaire qui sera nécessaire pour le système de NEP, le réchauffage du mout sortant de la garde, la station de stérilisation des futs et finalement, par les employés de la Rulles pour boire, faire la vaisselle, ...

Afin de fournir cette chaleur, les producteurs installés actuellement sont :

- Une chaudière à mazout située dans le bâtiment industriel, connectée à un ballon d'eau chaude et dont les caractéristiques sont reprises ci-dessous :

<b>Chaudière ALTRON 60</b>	
<b>Année d'installation</b>	2004
<b>Puissance thermique au foyer (kW)</b>	70
<b>Puissance thermique utile (kW)</b>	63,5
<b>Efficacité énergétique</b>	80%
<b>Température max. admissible (°C)</b>	110
<b>Capacité réservoir eau (l)</b>	37

<b>Ballon SMART 130 litres</b>	
<b>Année d'installation</b>	2004
<b>Température max</b>	90°C
<b>Capacité primaire (l)</b>	31
<b>Capacité secondaire (l)</b>	99
<b>Pertes statiques (W)</b>	40
<b>Débit continu à 60°C (l/h)</b>	465
<b>Débit primaire (l/s)</b>	0,7
<b>Puissance</b>	31

Elle permet de fournir l'eau de chauffage qui sera nécessaire à la chambre chaude du bâtiment industriel, qui doit être constamment à 21°C, mais également nécessaire afin de produire l'eau

chaude sanitaire utilisée pour les nettoyages (CIP), pour le réchauffage du mout en sortie de garde et pour alimenter la station de stérilisation des futs.

- Une seconde chaudière à mazout située dans le bâtiment administratif et dont les caractéristiques sont reprises ci-dessous. Elle est également équipée d'un ballon d'eau chaude dont nous ne connaissons pas l'origine.

<b>Chaudière CRYVALIS XENIUM C22</b>	
<b>Année d'installation</b>	2003
<b>Puissance nominale (kW)</b>	16/22
<b>Débit calorifique (kW)</b>	17,4/24
<b>Rendement charge 100% et 70°C</b>	91%
<b>Rendement charge 30% et 50°C</b>	92,8 %
<b>Capacité réservoir eau (l)</b>	43

Elle permet donc de fournir le chauffage du bâtiment administratif, mais également de produire l'eau chaude sanitaire de ce bâtiment.

- Un brûleur à gaz (propane) situé sous la cuve d'ébullition. Les seules caractéristiques techniques que nous avons, est que son rendement est d'environ 71% et que son débit tourne autour de 0,4 litres de propane par minute à une pression de 1,5 bar. Il va ainsi servir pour la création des brassins (préparation des eaux, ébullition...)

NB : Il existe également une chaudière à vapeur au propane DG 160, datant de 2014 située dans le bâtiment industriel et dont la puissance nominale est égale à 105 kW. Cette chaudière sert principalement pour l'enfuteuse afin de réaliser la stérilisation des futs de la brasserie, le maintien en température des produits de nettoyage mais également afin de chauffer l'eau nécessaire à l'enfuteuse. Cependant, la production de vapeur ne sera pas prise en compte dans le cadre de cette étude.

## **Procédé de fabrication de la bière**

La production de la bière au sein de la brasserie résulte d'un processus assez long, faisant intervenir une série d'étapes plus ou moins complexe. Afin de bien comprendre la façon dont se répartit la consommation thermique au sein de la brasserie, il est nécessaire d'analyser le mode opératoire utilisé pour réaliser un brassin. Pour ce faire, une visite sur les lieux suivit des explications d'un des brasseurs à permis de reconstituer le schéma de production général d'une bière.

On peut diviser le brassage de la bière en deux : la première partie concerne la préparation des eaux alimentaires et la seconde, le procédé de fabrication de la bière.

### Préparation des eaux alimentaires

A la veille de chaque brassin, il est nécessaire de préparer les eaux alimentaires, c'est-à-dire que les eaux alimentaires sont chauffées jusqu'à la température de 92°C. Il s'agit ici d'une étape importante puisqu'elle va permettre d'obtenir les températures désirées le jour d'un brassin et ainsi de gagner un temps considérable. Un schéma a été reconstitué afin de bien comprendre les étapes de la préparation :

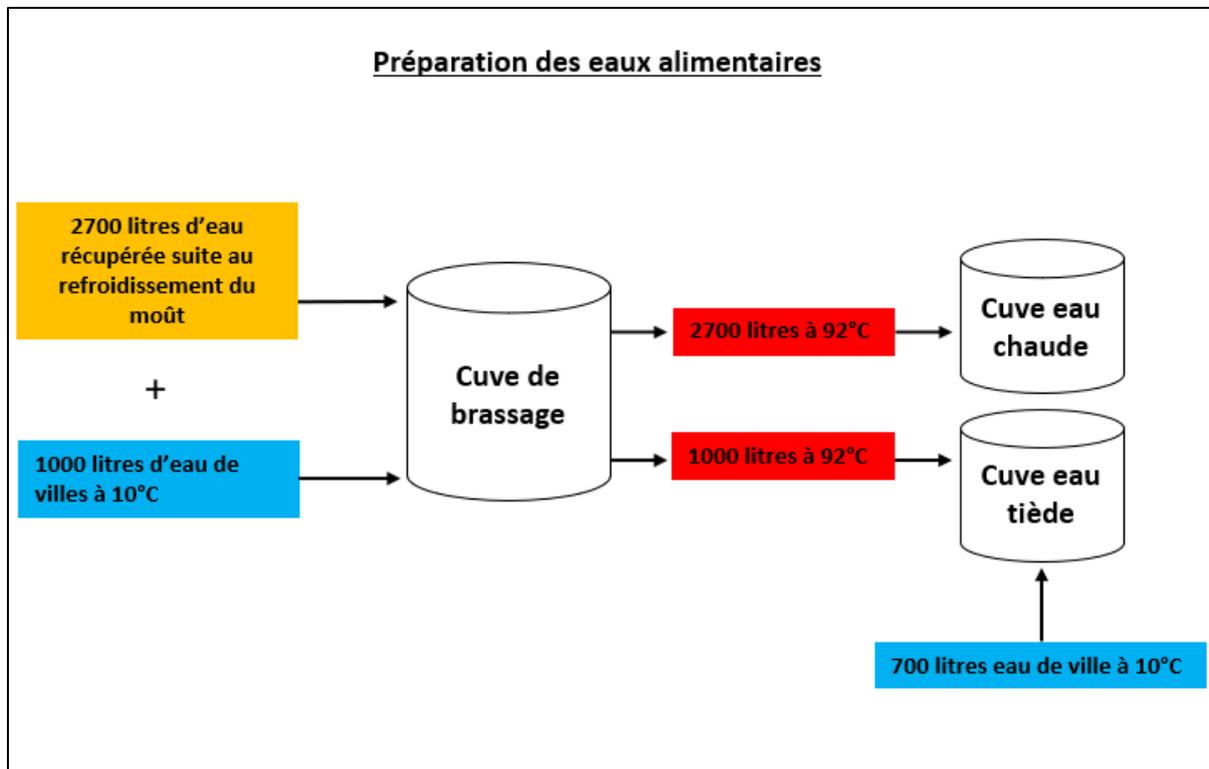


Figure 12 : Schéma de principe du préchauffage des eaux alimentaires

En réalité, la préparation des eaux alimentaires commence le jour d'un brassin, après la phase d'ébullition. En effet, la brasserie dispose d'un échangeur de chaleur, permettant au moût d'être refroidi à la température demandée pour la phase de fermentation. Ce dispositif permet alors de récupérer plus ou moins 2700 litres d'eau à 65°C, et donc d'économiser une certaine quantité d'énergie. Cependant, le brassage de la bière étant un procédé discontinu, cette eau perdra quelques degrés avant son utilisation. (Généralement, 5 à 6 °C).

Ainsi, au moment de la préparation des eaux alimentaires, l'eau récupérée (généralement la veille) via l'échangeur de chaleur est utilisée. En plus de cette eau, un ajout de 1000 litres d'eau de distribution, dont la température est estimée à environ 10°C (en été, on parlera plutôt de 15°C) est nécessaire. On obtient alors 3700 litres d'eau, qui seront chauffés à 92°C dans une cuve sous laquelle se trouve un brûleur à gaz au propane, et qui correspond à la même cuve que celle utilisée pour réaliser l'empâtage et l'ébullition.

A la fin de la période de chauffe, 2700 litres sont alors envoyés dans une cuve d'eau chaude, afin de la stocker. Celle-ci servira alors pour monter rapidement au second pallier de température lors de l'empâtage, mais également afin de rincer les drêches lors de la phase de filtration. Ici encore, il y aura une perte de quelques degrés avant son utilisation.

Finalement, les 1000 litres restant et qui se trouvent toujours dans la cuve de brassage, vont subir un ajout de 700 litres d'eau de distribution, afin d'obtenir 1700 litres qui seront à leur tour envoyé dans une autre cuve, que l'on nomme « cuve d'eau tiède ». Cette eau servira afin de procéder au premier pallier d'empatage le jour d'un brassin, et perdra donc quelques degrés avant son utilisation.

### Brassage de la bière

Afin d'obtenir le produit final, de nombreuses opérations se succèdent. Pour permettre de comprendre et de suivre les explications qui vont suivre, un schéma a été créé :

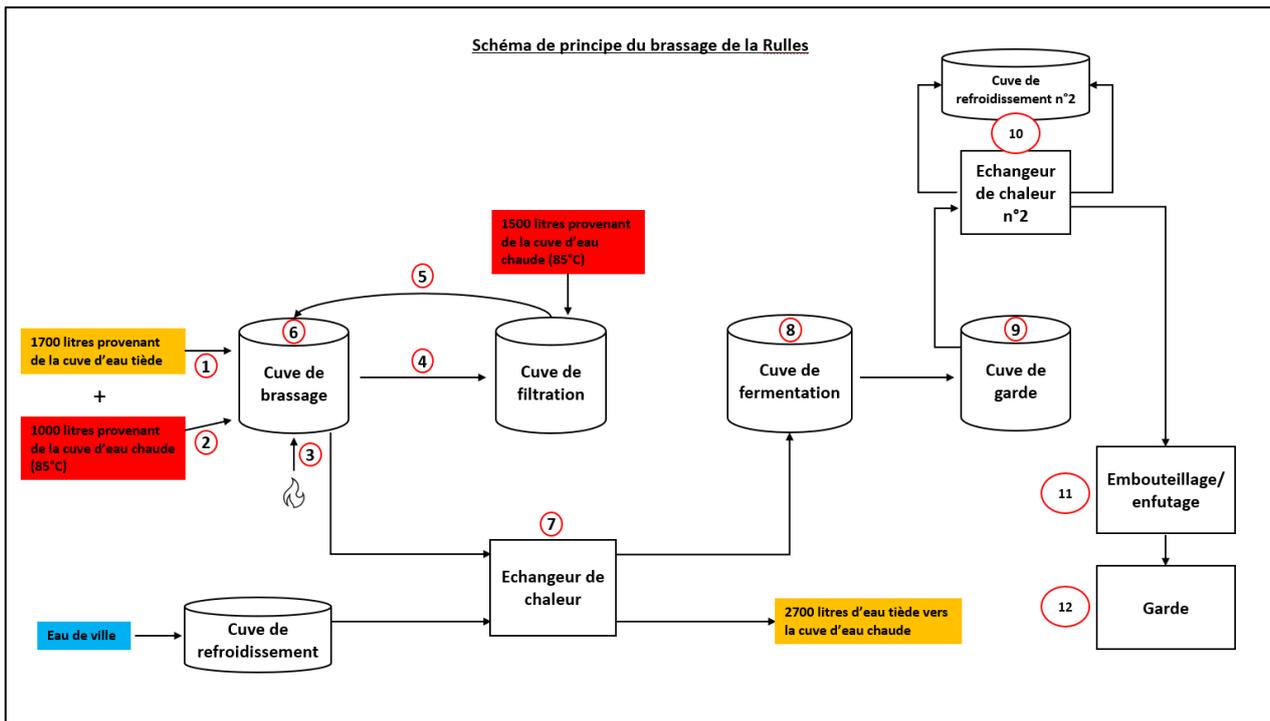


Figure 13 : Schéma de principe de production de la Rulles

La première étape effectuée le jour d'un brassin, consiste à envoyer les 1700 litres d'eau qui se trouvent dans la cuve d'eau tiède et préparés la veille, vers la cuve de brassage (1). Ainsi, étant donné que l'eau a perdu quelques degrés avant son utilisation, la température tourne généralement aux alentours de 55 °C. Il s'agit ici du premier pallier de l'empatage. Après 30 minutes, sans chauffer la cuve, on ajoute alors environ 1000 litres d'eau, qui proviennent de la cuve à eau chaude, et dont la température à ce moment-là à tourne aux alentours de 85°C (2). Cet ajout va ainsi permettre d'atteindre le second palier de l'empatage, qui s'effectue à 64°C, le plus rapidement possible (environ 2 minutes). Au même moment, le bruleur à gaz situé sous la cuve d'ébullition est alors allumé, afin d'arriver progressivement (en plus ou moins 40 minutes) au troisième et dernier pallier de la phase d'empatage, qui a lieu à une température d'environ 72 °C (3). Finalement, le chauffage est poussé jusqu'à atteindre la température de 75°C en plus ou moins 40 minutes. Une fois cette température atteinte, la maïsche obtenue est alors transférée vers la cuve de filtration.

Lors de la phase de filtration, l'eau enrichie en sucre (autrement dit, le mout) est séparée des drêches. (4) Cependant, les premiers litres filtrés doivent subir une recirculation, qui dure environ 3 minutes. (5) A la fin de la filtration, les drêches, séparées de l'eau, et qui se sont

déposées dans le fond de la cuve, son alors rincées, à l'aide du reste d'eau qui se trouve dans la cuve à eau chaude (généralement après le rinçage, il reste tout de même environ 200 litres dans le fond de la cuve à eau chaude). Une fois la filtration terminée, le mout, séparé des drêches et se trouvant à nouveau dans la cuve de brassage, est amené à ébullition pendant une durée d'environ 85 minutes. (6) A noter ici, que le bruleur à gaz est allumé pendant que la filtration à lieu, amenant le mout à une température de 95°C lorsque la filtration est terminée.

Après ébullition, le mout est refroidi à une température de 16,5 °C, via un échangeur de chaleur avant d'être envoyé dans des cuves ouvertes pour effectuer la fermentation. (7) L'eau permettant le refroidissement du mout provient d'une cuve de refroidissement, permettant d'atteindre une température de 1,5 °C. Grace à cet échange, on récupère alors 2700 litres d'eau à environ 60°C via l'échangeur, qui est stockée dans la cuve d'eau chaude pour permettre sa réutilisation lors du brassin suivant.

Pendant la fermentation (qui dure plus ou moins 1 semaine), il est nécessaire de conserver une certaine température qui tourne aux alentours de 16,5°C afin que les levures puissent effectuer leur travail dans de bonnes conditions (8). En effet, étant une réaction exothermique, il est nécessaire de refroidir les cuves. Pour ce faire, de l'eau provenant de la même cuve d'eau froide qui permet le refroidissement du mout, est utilisée afin de refroidir les cuves de fermentation.

Une fois la fermentation terminée, le mout est alors envoyé vers les cuves de garde (9) ou il restera entre 7 et 12 jours avant d'être réchauffé puis conditionner. La phase de garde, qui s'effectue à une température de 6-7°C, demande également un refroidissement constant. Celui-ci s'effectue l'aide d'une seconde cuve d'eau froide contenant également de l'eau à 1°C. A la différence de la fermentation, il s'agit ici d'un circuit fermé, qui impliquant que l'eau recircule en permanence entre les cuves de gardes et la cuve d'eau froide, diminuant ainsi la consommation en eau. Une fois le temps de garde atteint, le mout sortant est alors réchauffé via un échangeur à une température de 14°C avant d'être embouteillé ou enfuté. (10) Ce réchauffement se fait à l'aide d'une cuve contenant de l'eau chauffée à environ 60°C via un ballon d'eau chaude sanitaire, lui-même chauffé par une chaudière à mazout. Cette eau est ensuite jetée à l'égout.

Finalement, après l'embouteillage et l'enfutage (11) (pour un brassin, environ la moitié est enfuté et l'autre embouteillé), la bière est stockée dans une chambre chaude pendant environ 2-3 semaines afin de permettre une refermentation (12). Cette chambre chaude est maintenue à une température constante de 21°C à l'aide de deux aérothermes.

### b. Détermination des besoins en énergie thermique de la brasserie

Pour permettre une optimisation énergétique de la brasserie artisanale de Rulles, il est nécessaire de reconstituer sa demande énergétique, et notamment celle en eau chaude et en chauffage, constituant des postes potentiels pour l'introduction de l'énergie solaire thermique. Pour ce faire, une série de calculs et de simulations sont effectuées. Le point suivant a pour objectif de reprendre les différentes étapes suivies afin de parvenir à cet objectif. Il est divisé en 3 parties : calcul des besoins énergétiques pour la production en eau chaude alimentaire (brassin), calcul des besoins énergétiques pour la production en eau chaude sanitaire et finalement, calcul des besoins énergétiques pour la production en eau chaude de chauffage.

#### **Calcul des besoins en énergie thermique pour un brassin [62]**

Il est possible de calculer l'énergie thermique nécessaire à chaque étape du processus de brassage, qui est directement proportionnel à la différence de température entre le début et la fin de l'étape considérée. Celle-ci est obtenue via l'équation suivante :

$$q_1 = \frac{C_p \cdot m \cdot \Delta T}{p} \text{ (kWh)}$$

Avec,

- **C<sub>p</sub>** = chaleur spécifique de l'eau, à savoir 4187 (J/Kg\*K)
- **m** = masse d'eau (Kg)
- **ΔT** = écart de température entre la température initiale (T<sub>1</sub>) et la température finale (T<sub>2</sub>)
- **p** = coefficient de conversion pour passer des J aux kWh, à savoir 3 600 000 J/kWh

Les besoins en énergie thermique pour le préchauffage des eaux alimentaires, l'empâtage et l'ébullition sont ainsi estimés. Les informations utiles sont résumées dans le tableau suivant :

Postes	Quantité (l)	T°initiale (°C)	T°finale (°C)	ΔT°	Cp (J/KgK)
<b>Préchauffage eaux alimentaires</b>	3700	44,5	92	47,5	4187
<b>Empatage</b>	2700	64	75	11	4187
<b>Ébullition</b>	3700	75	100	25	4000
<b>Évaporation (5,4%)</b>	200	100	100	0	2258

Tableau 3 : Données relatives aux différents postes de chauffage

La récupération de chaleur après la phase d'ébullition constitue une réduction de la demande en énergie pour la production en eau chaude alimentaire. Par conséquent, il est nécessaire de la prendre en compte dans nos calculs. Pour ce faire, l'énergie récupérée est considérée au moment du choix de la températures initiale de la phase du préchauffage des eaux alimentaires. En effet, comme nous pouvons le voir dans le tableau 3, les eaux alimentaires ont une température de départ de 44,5°C. Cette température est obtenue via l'équation suivante :

$$T_f = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2}{m_1 + m_2}$$

Avec,

- $m_1$  = masse d'eau à la température  $T_1$
- $m_2$  = masse d'eau à la température  $T_2$
- $T_f$  = température finale après mélange entre  $m_1$  et  $m_2$

Sachant qu'on récupère 2500 litres d'eau à 65°C, qu'elle perd environ 4°C avant sa réutilisation et qu'on la mélange avec 1200 litres d'eau à 10°C avant son préchauffage, on peut alors connaître la température de départ des eaux alimentaires.

Un autre point important qu'il faut considérer dans le calcul, concerne l'évaporation de l'eau. En effet, il faut également prendre en compte le fait que d'importantes pertes de chaleur sont amenées lors de l'ébullition, via l'évaporation de l'eau. Ces pertes peuvent facilement se calculer via l'équation suivante, en se basant sur les données du tableau 3 :

$$q_2 = \frac{m_{evap} \cdot L}{p} \text{ (kWh)}$$

Avec,

- $m_{evap}$  = quantité d'eau évaporée (kg)
- $L$  = Chaleur spécifique d'évaporation de l'eau, qui vaut 2258 kJ/kg
- $P$  = coefficient de conversion pour passer des J aux kWh, à savoir 3 600 000 J/kWh

Connaissant la quantité de mout qui est récupérée après ébullition, ainsi que la quantité d'eau avant l'ébullition, il est facile de connaître la quantité d'eau évaporée par brassin.

Finalement, il faut prendre en compte les pertes par conduction thermique au travers des parois de la cuve durant le process. Pour ce faire, les critères de la cuve dont nous avons besoin pour notre calcul sont repris ci-dessous :

- Capacité totale de la cuve : 4170 litres
- Diamètre interne = 1,96 mètres
- Diamètre externe = 2 mètres
- Hauteur (hors foyer à gaz) = 1,57 m

- Épaisseur de la paroi interne en inox = 2 mm ; et de la paroi externe = 2 mm ; épaisseur de laine de verre (isolation) = 40 mm ; épaisseur totale des parois de la cuve = 4,4 cm
- La conductivité thermique de l'acier inoxydable = 17 W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>
- La conductivité thermique de la laine de verre se situe entre 0.032 et 0.04 W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>. La valeur se situant entre les deux a donc été retenue, à savoir 0.036 W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>.

Il a cependant fallu effectuer certaines hypothèses :

-L'épaisseur des parois de la cuve est considérée la même pour toute la surface. Seul le couvercle du dessus ne dispose pas d'isolation et est donc composé simplement d'une couche en inox de 2 mm

-On considère que la température moyenne de la pièce environnante à la cuve est égale à 10°C. La pièce dans laquelle elle se trouve n'étant pas chauffée.

-Par facilité, on considère qu'il n'y a pas d'échange par rayonnement et convection pour la face des parois de la cuve interne (ce qui est bien évidemment faux). Ainsi, on ne considère que la résistance superficielle de la paroi extérieure à la cuve, qui vaut ici 0,13 m<sup>2</sup>K/W pour les flux horizontaux et 0.1 m<sup>2</sup>K/W pour les flux verticaux.

-Etant donné que pour chacun des postes considérés ici, le bruleur est en marche constamment, on considère qu'il n'y a pas de déperditions vers le bas de la cuve.

Dé lors, il est possible de calculer les déperditions thermiques au travers de la cuve, via l'équation suivant :

$$q_3 = \frac{\left( \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{se}}} \cdot S \cdot (T_{wort} - T_{in}) \right) \cdot \tau}{1000} \text{ (kWh)}$$

Avec,

- $\frac{1}{\alpha_{si}}$  = résistance thermique de la surface interne du réservoir (m<sup>2</sup>K/W)
- $\frac{1}{\alpha_{se}}$  = résistance thermique de la surface externe du réservoir, en contact avec l'air (m<sup>2</sup>K/W)
- $\delta$  = l'épaisseur de la couche du matériau considéré et utilisé dans les parois de la cuve (m)
- $\lambda$  = Conductivité thermique de la couche du matériau considéré (W/m.K)
- n = Nombre de couches différentes de matériaux composant la paroi de la cuve
- S = surface totale des parois de la cuve (m<sup>2</sup>)
- T<sub>wort</sub> = température du mout (°C)
- T<sub>in</sub> = température ambiante (de la pièce dans laquelle se trouve la cuve) (°C)
- $\tau$  = la durée du procédé (h)

On peut alors à additionner toutes les dépenses énergétiques calculées ci-dessus, à savoir les pertes par évaporation, les pertes au travers des parois et finalement, les dépenses en énergie utile. On obtient alors les résultats suivants :

Poste	Pertes par évaporation q3 (kWh)	Perte à travers les parois q2 (kWh)	Energie utile q1 (kWh)	Total
Préchauffage eaux alimentaire	/	8,2	204,41	212,61
Empatage	/	3,85	34,54	38,39
Ébullition	125,44	4,62	102,78	232,84
<b>TOTAL =</b>				<b>681.47</b>

Tableau 4 : Résultats des consommations par poste de brassage

Actuellement, la production d'un brassin demande une consommation en énergie thermique de 681,47 kWh. A noter qu'il s'agit ici de la quantité d'énergie dépensée par le bruleur à gaz située sous la cuve de brassage, c'est à dire que cette valeur prend en compte son rendement qui, repelons le, est égale à 71%. Par conséquent, il s'agit ici de la consommation en énergie primaire. Sachant que la brasserie effectue en moyenne deux brassin par semaine, et qu'il y a 52 semaines dans une année (en négligeant les jours de congés) on peut alors recalculer la demande annuelle pour la production en eau chaude alimentaire, qui s'élève alors à 70,87 MWh.

### Calcul des besoins pour la production en eau chaude sanitaire

En plus des besoins en énergie thermique du process, il est nécessaire de produire de l'eau chaude sanitaire qui servira pour le nettoyage du matériel, le réchauffage du mout sortant de la garde mais également afin de fournir de l'eau chaude destinée à la station de stérilisation des futs et aux employés de la Rulles (au niveau du bâtiment administratif). Pour ce faire, il a d'abord fallu récolter les données relatives à la consommation d'eau du bâtiment, ce qui n'est pas une tâche facile lorsque le bâtiment étudié est une brasserie. En effet, elles ont pour principale caractéristique de consommer énormément d'eau froide et chaude, et le profil est très variable d'une brasserie à l'autre. Il a donc fallu se baser sur les dires des brasseurs, mais également effectuer quelques estimations, tout en essayant de se rapprocher le plus de la réalité.

#### *Nettoyage du matériel*

L'hygiène et le nettoyage du matériel est un aspect très important dans l'industrie agroalimentaire. C'est pourquoi, il existe généralement ce que l'on appelle un système de nettoyage en place (NEP ou CIP en anglais). Le NEP fait référence à la méthode utilisée dans afin de nettoyer les surfaces intérieures des tuyaux, des cuves et des réservoirs, sans démonter le matériel (contrairement à l'ancien temps). Au sein d'une brasserie, il permet donc de nettoyer correctement et quotidiennement le matériel de brassage, avant ou après chaque utilisation. Par exemple, les cuves de garde sont lavées après chaque utilisation alors que les cuves de fermentation, avant chaque utilisation. Le système de nettoyage en place est généralement réalisé en plusieurs étapes. Au sein de la brasserie de la Rulles, on en distingue majoritairement deux : Nettoyage à l'eau chaude avec un produit (acide, soude ou chlorodes, ...) et ensuite une série de rinçage à l'eau froide. La quantité d'eau chaude nécessaire pour le nettoyage en fonction du matériel considéré est reprise dans le tableau 5. A noter que cette eau chaude provient du ballon d'ECS chauffé par la chaudière à mazout à une température d'environ 60°C.

<b>Consommation en eau à 60°C pour le CIP (l)</b>	
<b>Cuves de fermentation</b>	60
<b>Cuves de garde</b>	130
<b>Embouteilleuse</b>	300
<b>Enfuteuse</b>	150
<b>Total =</b>	<b>640</b>

*Tableau 5 : Consommations en eau pour le CIP*

Ainsi, pour chaque brassin, on considère que la consommation en eau chaude à 60°C destinée au CIP est égale à 640 litres.

En plus de cette eau, la réalisation de blocs chauds est nécessaire pour le nettoyage de la cuve de brassage, des canalisations mais également de la cuve filtre. Cependant, l'eau chaude utilisée pour réaliser les blocs chauds ici provient de celle récoltée lors du refroidissement du brassin précédent via l'échangeur de chaleur. Ainsi, on distingue :

- Le bloc chaud 1 : il est réalisé après chaque brassin et est obtenu via le mélange de 200 litres d'eau chaude et de 200 litres d'eau de ville. Après son utilisation, une série de rinçage à l'eau froide est effectué.
- Le bloc chaud 2 : il est réalisé 2 à 3 fois par an et permet un nettoyage intensif du matériel. Le bloc chaud 2 nécessite l'utilisation de 1600 litres d'eau chaude. Après son utilisation, un premier rinçage avec le reste de l'eau chaude provenant du refroidissement (environ 1000 litres) est effectué, suivi d'une série de rinçage secondaires à l'eau froide.

Les blocs chauds nécessitent l'intervention du bruleur à gaz afin de monter l'eau chaude (qui est à 65°C après le refroidissement du mout) à la température de 75°C. Le tableau suivant permet de résumer ce qui vient d'être dit :

	<b>Quantité (l)</b>	<b>T° initiale (°C)</b>	<b>T° finale (°C)</b>	<b>Fréquence</b>
<b>Bloc chaud 1</b>	400	37,5	75	Après chaque brassin
<b>Bloc chaud 2</b>	1600	65	75	2 à 3 fois par an

*Tableau 6 : Critères liés aux blocs chauds*

On peut constater que la température de départ du bloc chaud 1 est égale à 37,5°C, correspondant à la température résultante du mélange entre l'eau chaude récupérée lors du refroidissement et l'eau froide (eau de ville), comme expliqué précédemment. De plus, étant donné que le nettoyage intensif (bloc chaud 2 + premier rinçage) met en jeu la totalité de l'eau chaude récoltée via le refroidissement du mout, le bruleur à gaz devra fournir un effort plus important pour préchauffer les eaux alimentaires destinées au brassin qui suivra un nettoyage intensif. Cependant, étant donné qu'ils sont peu fréquents, la quantité d'énergie supplémentaire qu'il faudra apporter via le bruleur à gaz par rapport à un brassin classique sera négligée dans cette étude, ainsi que la quantité nécessaire pour atteindre les 75 degrés nécessaires aux blocs chauds.

### *Le réchauffage du mout en sortie de la garde*

Un autre point de puisage en eau chaude sanitaire au sein de la brasserie à lieu durant l'étape du réchauffage du mout en sortie de garde. En effet, avant chaque réchauffage, il est nécessaire de remplir une cuve (dont le volume est d'environ 2500 litres) d'eau chaude sanitaire, qui servira alors comme source de chaleur pour l'échangeur. Cependant, la cuve est généralement remplie plusieurs heures avant le réchauffage, car l'opération prend pas mal de temps. Par conséquent, cette eau perd quelques degrés avant son utilisation. De plus, lorsque cette cuve est remplie un vendredi, il est nécessaire d'augmenter la quantité d'eau chaude sanitaire afin de compenser les pertes en température, qui seront plus conséquentes après un week-end.

Afin de faciliter l'estimation, on considérera que le planning de brassage est constant sur toute l'année, supposant que les jours de brassage ont lieu les mardis et jeudi. Ainsi, la cuve est remplie à chaque veille de brassin, avec une quantité en eau équivalente à 1000 litres.

### *Station de stérilisation des futs :*

Le dernier point de puisage de l'eau chaude sanitaire se passé au niveau de la station de stérilisation des futs. En effet, cette dernière demande une certaine quantité d'eau chaude afin de permettre d'alimenter ses différents postes de lavage, en plus des besoins en produits chimiques et en vapeur. Pour ce faire, un système à été mit en place au sein de la brasserie.

Tout d'abord l'eau chaude sanitaire est produite via l'échangeur accumulateur de l'eau à environ 40°C via la chaudière à mazout. Cette eau est alors envoyée dans une cuve constituée d'un serpentín à vapeur, lui-même alimenté par la chaudière à vapeur de la brasserie. Ainsi, l'eau chaude sanitaire monte en température, jusqu'à atteindre celle de 85°C, qui est la température de consigne pour les étapes de lavage et de rinçage des futs. Le tableau suivant, permet de résumer la quantité d'eau chaude sanitaire nécessaire pour alimenter la station de stérilisation des futs.

<b>Caractéristiques</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre futs /an</b>	7647
<b>Nombre litres/fut</b>	12
<b>Température de l'eau (°C)</b>	40
<b>Quantité eau consommée/an</b>	<b>91764</b>

*Tableau 7 : Consommation en eau de l'enfuteuse*

Etant donné que la production de vapeur ne rentre pas dans le cadre de cette étude, seule la consommation en eau provenant de l'échangeur/accumulateur est reprise ici. Ainsi, la demande annuelle en eau chaude sanitaire destinée à la station de stérilisation des futs s'élève à 91764 litres d'eau. Par semaine, cela représente plus ou mains 1764 litres.

Etant donné que l'eau pour la station est puisée à 40°C, notamment pour cause de débit trop important, mais également que l'eau chaude sanitaire puisée au niveau des différents postes cités précédemment se fait à une température de 60°C, il est nécessaire d'uniformiser les températures afin de permettre d'additionner les volumes puisés entre eux. En générale, on se base sur des volumes d'eau équivalents à 60°C. Pour ce faire, l'expression suivante est utilisée :

$$V_{60} = V_x \cdot \frac{T_x - 10^{\circ}\text{C}}{60^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}}$$

Avec,

- $V_x$  = volume de l'eau à uniformiser
- $T_x$  = température de l'eau que l'on souhaite uniformiser

On peut alors recalculer la quantité d'eau équivalente à 60°C consommée par la station de stérilisation des futs sur une semaine, Celle-ci s'élevant alors à 1058 litres.

#### *Consommation d'eau pour le bâtiment administratif*

Finalement, la dernière source de puisage en eau chaude sanitaire rencontrée au sein de la brasserie concerne la demande en eau par les employés du bâtiment administratif. Etant donné que l'occupation de ce bâtiment est destinée principalement aux bureaux et pour la pause du midi, un profil de consommation tiré d'une étude provenant de l'EDF permet d'obtenir un chiffre représentatif de la consommation d'eau dans un bureau en absence de besoins particuliers (douche...). Celle-ci serait située entre 2 et 6 litres d'eau chaude à 60°C par jour et par personne. Etant donné que les employés de la brasserie son compté au nombre de 6, et considérant une consommation moyenne de 4 litres par personne et par jour, la demande en eau pour le bâtiment administratif sur une journée, s'élèverait alors à 24 litres par jour. Etant donné que les sources de puisage citées précédemment se réfèrent à la consommation en eau chaude sanitaire sur une semaine, et afin d'uniformiser le tout, il est alors nécessaire de multiplier ce nombre par 5. En effet, la brasserie est considérée ouverte du lundi au vendredi. On obtient alors une consommation de 120 litres par semaine.

#### *Calcul de la consommation en énergie pour la production d'ECS*

Le tableau 8 permet de reprendre les différents besoins en eau chaude sanitaire nécessaires pour la brasserie par semaine.

Poste	Quantité (l)
<b>CIP</b>	1280
<b>Réchauffage du mout</b>	2000
<b>Station de stérilisation</b>	1058
<b>Bureaux</b>	120
<b>TOTAL/semaine =</b>	<b>4458</b>

*Tableau 8 : Résultats des consommations en eau chaude par poste ECS*

Ainsi, la quantité d'eau chaude sanitaire à 60°C qu'il est nécessaire de produire par semaine s'élève à 4458 litres. Il est alors possible d'estimer l'équivalent en énergie en utilisant la même formule que celle utilisée pour calculer la demande en énergie thermique du process de brassage.

<b>BESOINS ECS à 60°C</b>	
<b>Quantité/semaine (l)</b>	4458
<b>T°initiale (°C)</b>	10
<b>T°finale (°C)</b>	60
<b>Cp eau (J/kgK)</b>	4187
<b>Demande énergétique/semaine (kWh)</b>	<b>259.25</b>
<b>Demande énergétique/an (MWh)</b>	<b>13.48</b>

*Tableau 9 : Consommation énergétique de l'ECS*

La demande énergétique par semaine est équivalente à 259,25 kWh. Ramenée sur une base de temps annuelle, celle-ci s'élève donc à 13,48 MWh. A noter ici qu'il s'agit d'une demande en énergie finale. Si on désire prendre en compte la demande en énergie primaire, il faut séparer les demandes en ECS pour le bâtiment administratif et le bâtiment industriel et appliquer les rendements des installations. On trouve alors :

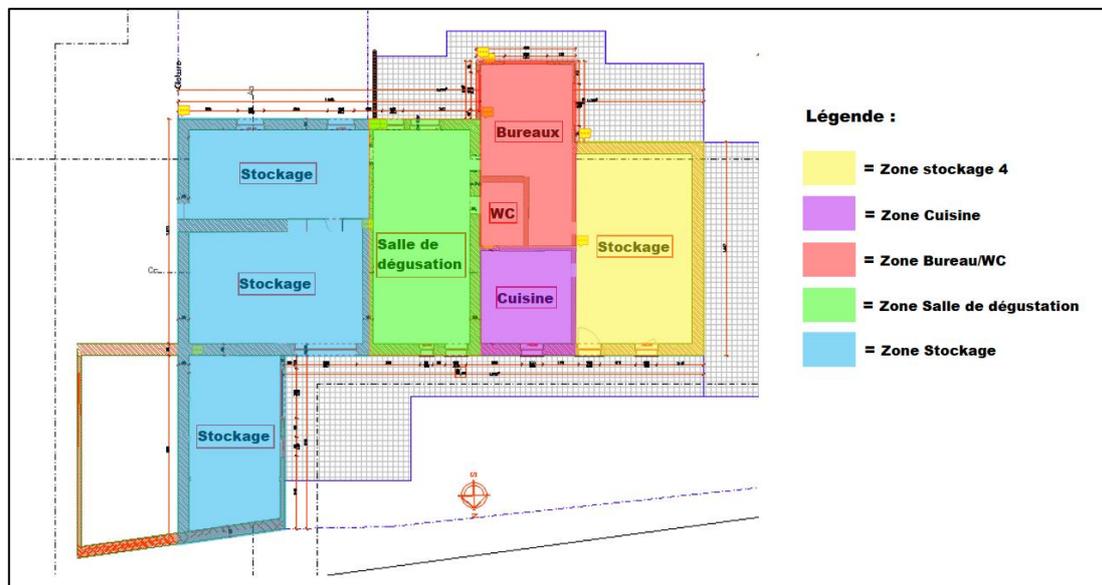
- Pour le bâtiment administratif, la demande en énergie primaire, sachant que le rendement de la chaudière de ce bâtiment (qui est une chaudière basse température) tourne alors alentours de 90%, est égale à 403 kWh par an.
- Pour le bâtiment industriel, la demande en énergie primaire, négligeant les pertes liées au stockage et sachant que le rendement de la chaudière à mazout est de 80%, est égale à 16,4 MWh par an.

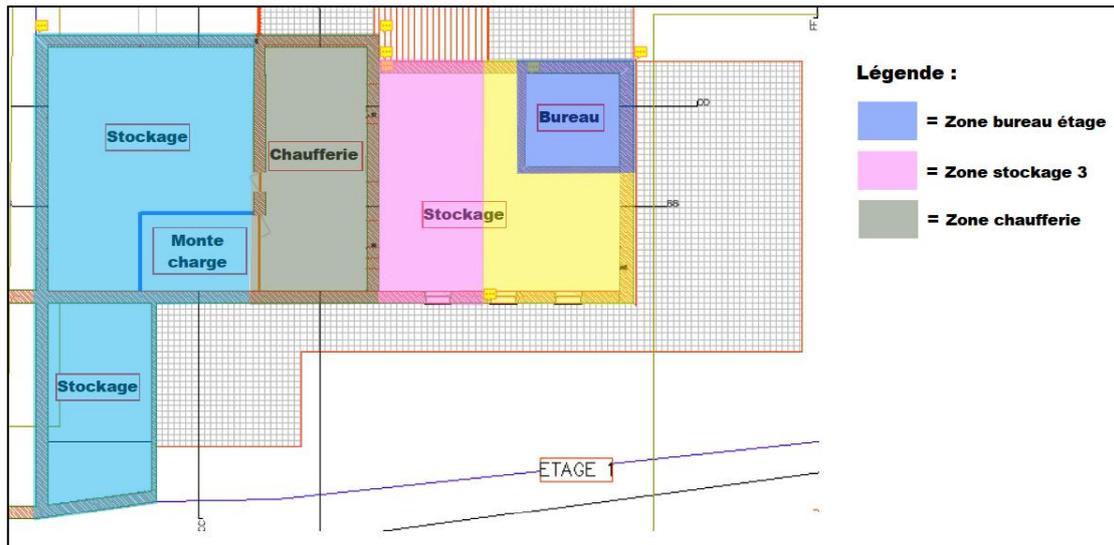
## Calcul des besoins pour le chauffage de la brasserie

### d.1 Détermination des zones et création d'un modèle en 3D via sketchup

Afin de connaître la demande de chauffage de la brasserie, l'établissement a été modélisé via le logiciel sketchup (Trnsys 3D). Pour commencer, par suite de nombreuses erreurs d'adjacence mais également de concavité, nous avons décidé de diviser le site en deux. Pour ce faire, deux modèles 3D ont été créés ; un pour le bâtiment administratif, et un pour le bâtiment industriel. Il a ensuite fallu diviser chaque partie en différentes zones thermiques afin de rassembler celles qui possédaient des régimes et horaires d'utilisation similaires. Les différentes zones que nous avons créées sur TRNSYS sont mises en évidence sur les figures ci-dessous, avec une couleur spécifique à chaque zone thermique.

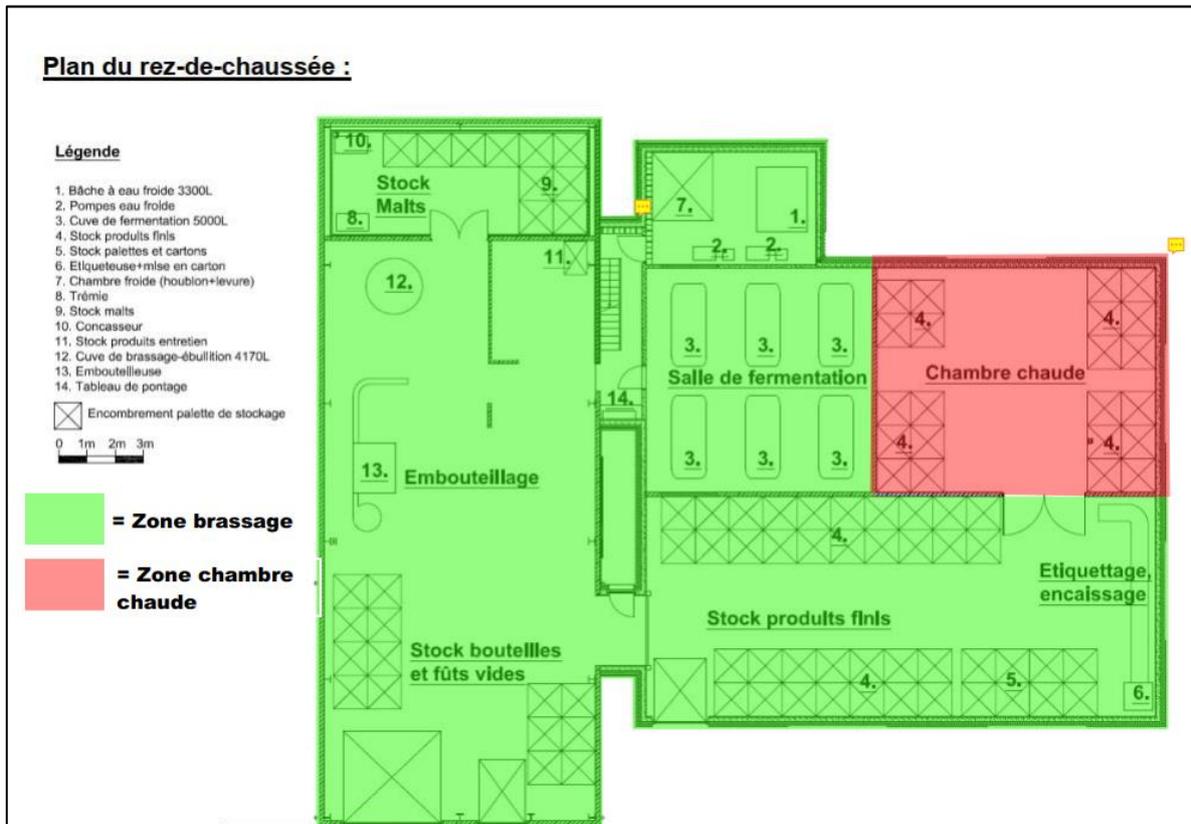
#### *Détermination des zones du bâtiment administratif :*

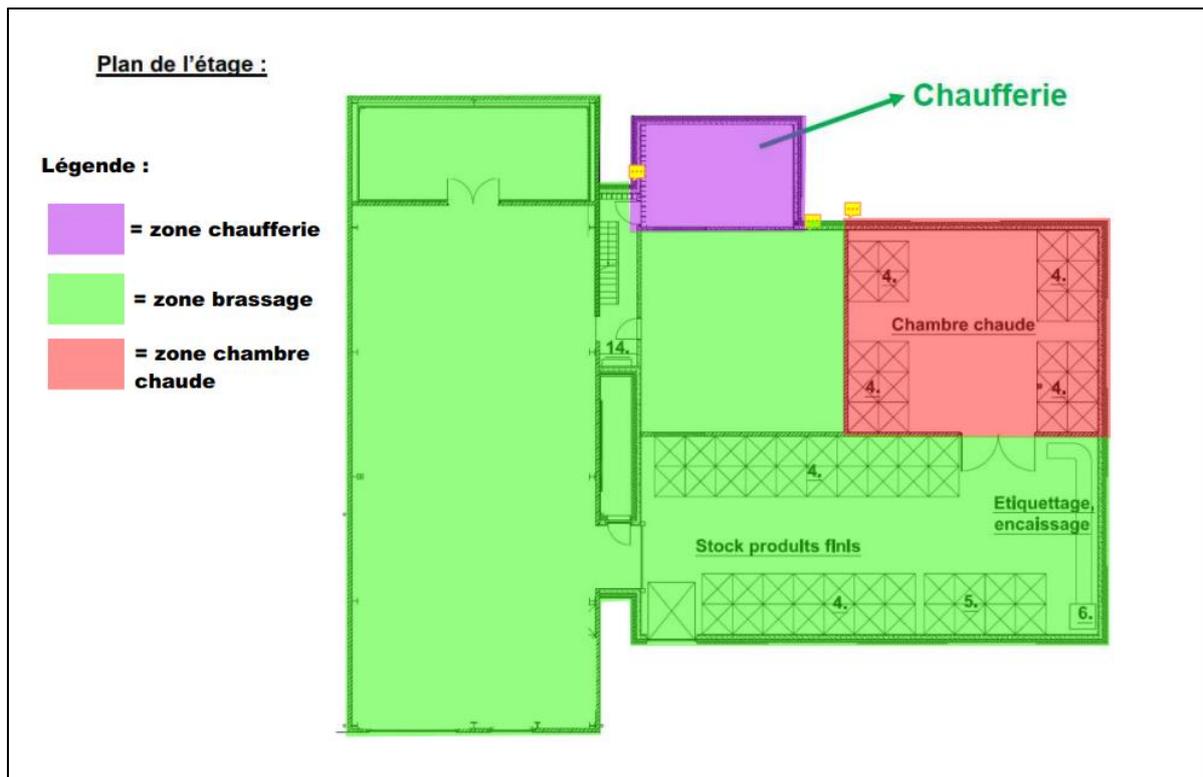




Le bâtiment administratif a été divisé en 9 zones thermiques (l'une des zones n'apparaît pas ici. Il s'agit du dernier étage, composé exclusivement de combles et constituant la zone « stockage 2 »). Parmi toutes ces zones, on en distingue notamment 4 qui interviendront dans la demande en chauffage ; la zone bureau étage, la cuisine, la zone dégustation et finalement, la zone bureau/WC.

*Détermination des zones du bâtiment industriel :*





Le bâtiment industriel, a été divisé en 3 zones thermiques ; une zone chaufferie, une zone chambre chaude et une zone brassage. Cependant, à la différence du bâtiment administratif, il n'y a qu'une seule zone ici qui interviendra dans la détermination de la demande de chauffage de la brasserie, il s'agit de la chambre chaude utilisée pour la refermentation en bouteille.

#### *Encodage TRNBuild*

Le paragraphe suivant permet de reprendre les étapes principales qui ont été suivies lors de l'encodage sur le logiciel TRNBuild. C'est-à-dire que pour se rapprocher le plus de la réalité et donc obtenir des résultats cohérent, il est nécessaire de prendre en compte de nombreux paramètres tels que l'horaire, le type de matériaux utilisés et leur épaisseur, les horaires d'occupation des pièces, les consignes de température, l'étanchéité du bâtiment, ...

#### *Éléments constructifs*

Une fois que les modèles ont été créés et correctement importés dans le logiciel TRNBuild, il est nécessaire d'effectuer une caractérisation de chacune des parois pour les deux bâtiments. Concernant le bâtiment administratif, étant donné qu'il s'agit d'un vieux bâtiment et que ce dernier a subi une multitude de transformations dans le temps, il n'a pas été facile d'identifier la composition de chacune des parois. C'est pourquoi, un certain nombre d'hypothèses ont été effectuées, en se basant sur la littérature, sur les observations effectuées lors des visites, sur les plans d'architecte et finalement, grâce aux informations fournies par le propriétaire. Ainsi, les tableaux ci-dessous reprennent les caractéristiques physiques des matériaux composant les parois respectivement pour le bâtiment administratif et pour le bâtiment industriel.

N°	Layers	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (kJ/hmK)	Capacité (kJ/KgK)
1	Bloc béton semi-lourd	2000	4,86	1
2	Polystyrène expansé (EPS)	30	0,126	1,45
3	Enduit chaux	1400	5,04	1
4	Enduit au plâtre	1200	2,052	1
5	Ardoise naturelle	2700	7,92	1
6	OSSATURE15_Laine_verre85	141	0,1764	1,11
7	Plaque fibro-platre	1150	1,15	1,1
8	Mortier Ciment	1700	3,6	1
9	Schiste (pierre naturelle)	2600	8,28	1
10	Ossature bois	600	0,468	1,6
11	Voile PE (pare-pluie)	950	1,188	2,2
12	OSSATURE15_Laine_bois85	183,5	0,189	1,9
13	Chape armée	2300	7,2	0,88
14	Dalle béton	2400	7,2	0,95
15	Carrelage grès	2000	4,32	1
16	Polyuréthane	40	0,09	1,4
17	Chape ciment	1700	4,14	1
18	Béton plein	2400	6,84	1
19	HOURLISO4	650	2,3	0,12
20	PLACO_BA13	790	1,15	0,8
21	Panneaux OSB	500	0,468	1,7
22	Terre cuite	1900	4,15	0,9
23	Laine de verre	12	0,14	0,84
24	Mortier	200	4,15	0,84
25	HOURLIS12BET	1300	4,8	6,48
26	BET_LOU040	2300	6,318	0,92

Concernant le tableau ci-dessus, une massless layer (soit une couche sans masse) a également été ajoutée. Il s'agit d'une couche d'air dont la résistance thermique est égale à 0,044 hm<sup>2</sup>K/kJ. On peut également noter que pour la couche numéro 6 et 12, il y a des chiffres qui apparaissent dans le nom. Ces chiffres correspondent aux pourcentages de matière présente dans la couche considérée. Par exemple, pour la couche « OSSATURE15\_Laine\_verre85 » on considère qu'il y a 15% de bois et 85% de laine de verre, les caractéristiques physiques étant alors calculées en fonction de cette proportion.

N°	Layers	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (kJ/hmK)	Chaleur spécifique (kJ/KgK)
1	Béton armé (dalle + prémur)	2400	9	1
2	Polystyrène	20	0,144	1,5
3	Panneau sandwich	92	0,09	1,2
4	EPS	30	0,126	1,45
5	Dalle pré cultivée + substrat	1100	1,26	1,2
6	Hourdis en béton	1800	4,14	1
7	Chape compression	1700	4,14	1
8	Lit sable	2000	7,2	1
9	Empierrement	2600	8,28	1
10	Panneaux OSB	500	0,468	1,7
11	Acier	7800	180	0,45
12	Polyuréthane	40	0,09	1,4
13	Panneaux MDF	800	0,648	1,7
14	ARGEX	1200	1,584	1
15	Bloc béton LOURD	2400	6,84	1
16	PVC	1300	0,612	0,9

Dans les tableaux ci-dessous on retrouver les différentes parois, qui ont été créés en se basant sur les couches décrites précédemment. Le nom de la paroi est repris dans la première colonne suivi de sa composition et finalement, de sa valeur U exprimée en W/m<sup>2</sup>K. Au niveau de sa composition, les différentes couches sont indiquées de la plus intérieur en haut, à la plus extérieur en bas.

Paroi	Matériaux	Epaisseur (m)	U-Value (W/m <sup>2</sup> K)
MUR_EXTENSION_BUREAUX	Enduit plâtre	0,01	0,692
	Bloc béton	0,14	
	Polystyrène	0,04	
	Enduit chaux	0,015	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,2</b>	
PLAFOND_BUREAUX_EXTENSION	Plaque fibro-plâtre	0,013	0,232
	Ossature laine verre	0,2	
	Ardoise naturelle	0,02	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,233</b>	
MUR_EXTERIEUR_SCHISTE	Enduit chaux	0,015	2,446
	Schiste	0,5	
	Enduit chaux	0,015	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,525</b>	
TOITURE_BAT_ADM	Ossature bois	0,16	0,694
	Par-pluie	0,01	
	Ardoise naturelle	0,02	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,19</b>	
MUR_EXT_SCHISTE_BUREAU_ETAGE	Plaque fibro-plâtre	0,013	0,430
	Ossature + laine bois	0,1	
	schiste	0,5	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,613</b>	
MUR_ANNEXE_ANTIENNE_BRASSERIE	Bloc béton	0,19	3,11
	Enduit chaux	0,015	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,205</b>	
DALLE_SOL_STOCKAGE	Chape armée	0,08	3,333
	Dalle béton	0,18	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,26</b>	
SOL_MAISON	Carrelage grès	0,01	3,038
	Chape ciment	0,07	
	Dalle béton	0,18	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,26</b>	
SOL_BUREAU/WC	Carrelage grès	0,01	0,234
	Chape ciment	0,03	
	Polyuréthane	0,1	
	Dalle béton	0,12	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,26</b>	
MUR_DEG_STOCKAGE	Bardage bois	0,02	0,539
	EPS	0,05	
	Bloc béton	0,140	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,210</b>	
MUR_ADJ	Plâtre	0,01	3,066
	Béton plein	0,230	
	Plâtre	0,01	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,25</b>	
MUR_CHAUFFERIE	Bloc béton	0,19	3,218
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,19</b>	
PLANCHER_1ER	Carrelage grès	0,01	2,665
	Mortier	0,05	
	BET_LOU040	0,04	
	HOURDIS12BET	0,12	
	PLACO_BA13	0,013	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,233</b>	
PLANCHER_1ER_ISOLE	Carrelage grès	0,01	0,414
	Mortier	0,05	
	BET_LOU040	0,01	
	HOURDIS12BET	0,12	
	Laine de verre + ossature	0,1	
	Placo_BA13	0,013	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,333</b>	
PORTE_CHAUFFERIE	Panneaux OSB	0,022	2,948
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,022</b>	
PORTE_BOIS	Bois	0,029	2,544
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,029</b>	
PLAFOND_CHAUFFERIE	Terre cuite	0,01	0,218
	ossature laine verre	0,2	
	Panneaux OSB	0,022	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,232</b>	
PLAFOND_COMBLE	PLACO_BA13	0,013	2,726
	HOURD12BET	0,12	
	BET_LOU040	0,04	
	MORTIER	0,05	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,223</b>	
PLAFOND_COMBLE_ISOLE	PLACO_BA13	0,013	0,441
	Laine bois + ossature	0,1	
	HOURD12BET	0,12	
	BET_LOU040	0,04	
	MORTIER	0,05	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,323</b>	

Paroie	Matériaux	Epaisseur (m)	U-Value (W/m <sup>2</sup> K)
PREMUR_CHAMBRE_CHAUDE	Béton armé	0,06	0,358
	Béton coulé	0,18	
	Polystyrène	0,1	
	Béton armé	0,065	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,405</b>	
TOITURE_JONCTION/HANGAR	Panneau sandwich PU	0,1	0,24
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,1</b>	
PREMURE_EXTENSION	Béton armé	0,06	0,361
	Béton coulé	0,12	
	Polystyrène	0,1	
	Béton armé	0,065	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,345</b>	
DALLE_SOL	Dalle sol	0,15	2,75
	Lit sable	0,05	
	Empierrement	0,25	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,45</b>	
SOL_CHAMBRE_CHAUDE	Dalle sol	0,15	0,355
	POLYSTYRENE	0,1	
	Lit sable	0,05	
	Empierrement	0,15	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,45</b>	
SOL_CHAUFFERIE	Beton armé	0,2	4
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,2</b>	
TOITURE_EXTENSION	HOURDIS	0,17	0,333
	Chape compression	0,05	
	Polystyrène	0,1	
	Dalle précultivée + substrat	0,05	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,37</b>	
MUR_ADJACENT	BLOC BETON LOURD	0,19	3,704
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,19</b>	
TOITURE_JONCTION_2	HOURDIS	0,17	0,320
	CHAPE COMPRESSION	0,05	
	Polystyrène	0,1	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,32</b>	
MUR_EXTERIEUR_HANGAR (JAUNE)	Panneau MDF	0,01	0,544
	POLYSTYRENE	0,05	
	ARGEX	0,15	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,21</b>	
PORTE_CHAMBRE_CHAUDE	POLYSTYRENE	0,05	0,629
	Panneaux OSB	0,022	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,072</b>	
PORTE_SECTIONNELLE	Acier galvanisé	0,01	1,031
	Polyuréthane	0,02	
	Acier galvanisé	0,01	
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,04</b>	
Porte_PVC	PVC	0,04	2,467
	<b>TOTAL =</b>	<b>0,04</b>	

Finalement il reste à prendre en comptes les parois vitrées de la brasserie. Pour ce faire, une librairie est mise à notre disposition sur le logiciel.

Pour le bâtiment administratif, plusieurs types de fenêtres ont été sélectionnées

-des fenêtres simple vitrage caractérisées par un coefficient thermique de  $5,69 \text{ W/m}^2\text{K}$  et un facteur solaire (g) de 82,3%

-des fenêtres double vitrage caractérisées par un coefficient thermique de  $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  et un facteur solaire (g) de 62%

Pour le bâtiment industriel, caractérisé par une superficie de vitrage très faible, le choix s'est porté sur du double vitrage avec un coefficient thermique de  $1,69 \text{ W/m}^2\text{K}$  et un facteur solaire de 66%.

#### Horaires d'occupation

La brasserie artisanale de Rulles est considérée ouverte du lundi au vendredi, de 8h à 16h. Afin de faciliter le travail, les jours fériés et les vacances sont négligées. Cependant, en fonction de la pièce considérée, l'horaire d'occupation peut varier :

- La cuisine du bâtiment administratif est occupée, durant les temps de midi, à savoir de 12h à 14h
- Pour le bureau/WC ainsi que le bureau à l'étage, on considère qu'ils sont occupés 40h par semaine, soit 8h par jour du lundi au vendredi.
- La salle de dégustation n'est occupée que lors de visites, peu fréquentes en hiver. Lorsqu'on est un jour de visite, elle est considérée occupée pendant environ deux heures. Etant donné que l'horaire d'occupation peut être très variable, on considérera 1 visite par mois un mercredi, avec une occupation de la salle de 12h à 14h.

Tous le reste de la brasserie est par conséquent supposé inoccupée. En effet, bien que la salle de brassage du bâtiment industriel constitue certainement l'endroit le plus occupé de la brasserie et que les gains internes qui lui sont liés, sont très conséquents (présence de nombreuses machines), celle-ci n'est pas chauffée et n'intervient donc pas directement dans la demande de chauffage du bâtiment. De plus, n'étant pas directement adjacente à la chambre chaude, celle-ci n'influence pas énormément la demande de cette dernière.

#### Infiltration

Ne connaissant pas l'étanchéité à l'air de la brasserie artisanale de Rulles, et étant donné qu'en Wallonie il n'existe pas de recommandations concernant l'étanchéité à l'air globale des bâtiments les suppositions suivantes ont été faites :

-Pour le bâtiment industriel, nous nous sommes basés sur le guide PEB (2015), qui exprime qu'en l'absence d'un test d'étanchéité du bâtiment, la valeur par défaut à prendre dans le calcul de la demande en énergie primaire de ce dernier, doit être supposée égale à  $12 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .

-Pour le bâtiment administratif, il existe un rapport écrit (COZEB), réalisé par le département de l'énergie et du bâtiment durable et dont le sujet porte sur la « détermination synthétique du parc de bâtiments résidentiels existants en Wallonie ». On peut ainsi y retrouver différents critères d'une habitation wallonne en fonction de son année de construction, dont notamment l'étanchéité. Etant donné que le bâtiment

administratif est caractérisé par une architecture de type vernaculaire, une étanchéité de 18 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> à été conservé.

Etant donné qu'ici l'étanchéité est exprimée en m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> ( $\dot{v}_{50}$ ), il est nécessaire de prendre en compte la surface de déperdition totale du bâtiment ( $A_{test}$ ) ainsi que son volume protégé. En effet, la valeur demandée sur TRNBuild exprime un taux de renouvellement d'air dont l'unité est le h<sup>-1</sup> ( $\dot{n}_{50}$ ). Les calculs réalisés afin d'obtenir le taux d'infiltration pour les deux bâtiments sont les suivants :

$$\dot{V}_{50} = \dot{v}_{50} \times A_{test} \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$\dot{n}_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{int.}} \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

De plus, les valeurs d'étanchéité utilisées pour le calcul du dessus sont des valeurs obtenues après un test sous une pression de 50 Pa. Par conséquent, il est nécessaire d'appliquer à  $\dot{n}_{50}$ , un facteur d'exposition au vent ( $a$ ), afin d'obtenir un taux de renouvellement qui se rapproche le plus des conditions réelles. Pour une exposition au vent moyenne, on prend généralement une valeur de  $a = 25$ . On peut ainsi calculer le taux de renouvellement d'air du bâtiment sous une pression d'environ 4 Pa ( $\dot{n}_4$ ), via l'équation suivante, qui correspondra à la valeur encodée dans le logiciel :

$$\dot{n}_4 = \frac{\dot{n}_{50}}{a}$$

Les résultats des calculs pour chacun des bâtiments sont repris dans le tableau **x**. Selon le guide PEB 2018, le volume protégé est constitué par l'ensemble des espaces d'un bâtiment que l'on souhaite protéger des déperditions thermiques vers l'environnement extérieur, du sol et de tous les espaces adjacents non chauffés. Il comprend donc les espaces chauffés en continu ou par intermittence ainsi que les espaces chauffés indirectement, dépourvu d'un corps de chauffe (couloirs, dégagements, ...). La surface de déperditions totale du bâtiment quant à elle, est déterminée sur base du volume protégé. C'est-à-dire qu'il s'agit de la surface totale de toutes les parois qui enveloppent le volume protégé.

	Volume protégé (m <sup>3</sup> )	A <sub>test</sub> (m <sup>2</sup> )	$\dot{n}_4$
<b>Bâtiment industriel</b>	3792	1779	0.225
<b>Bâtiment administratif</b>	494	363	0.529

Tableau 10 : Calcul du taux d'infiltration

### Chauffage

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, chaque partie de la brasserie possède son propre système de production et de distribution de la chaleur. Les critères devant être pris en compte pour la simulation sont repris ci-dessous :

-Pour le bâtiment industriel, seule une zone possède une consigne de chauffage. Il s'agit de la chambre chaude, avec une consigne de chauffage de 21°C. Le mode d'émission de chaleur au sein de la pièce est effectué à l'aide de deux aérothermes. Etant donné qu'il

s'agit d'un système d'émission par l'air, la part radiative de ce système est alors considérée nulle et l'échange se fait donc à 100 % par convection.

-Pour le bâtiment administratif, 4 zones possèdent une consigne de chauffage. Il s'agit de la salle de dégustation, de la cuisine, de la zone bureaux/WC et finalement du bureau qui se trouve à l'étage. Ainsi, pour chacune de ces zones, la consigne de chauffage est respectée en fonction des horaires d'occupation définis au préalable. Lorsque les pièces sont occupées, on considérera une température de 20°C dans la pièce. Dans le cas contraire, la température est alors maintenue à 15°C, sauf pour la salle de dégustation. En effet, étant très peu occupée (et par conséquent chauffée), la température lorsque le chauffage n'est pas allumé est dès lors maintenue à 10°C.

Afin d'obtenir la valeur réelle du besoin en chaleur, la puissance du système de chauffage sera considérée illimitée pour les deux systèmes.

#### Gains internes

Des gains internes ont été ajoutés en fonction de l'occupation de la zone considérée. Ceux-ci sont résumés ici :

- Pour le bâtiment administratif, on considérera :
  - Les gains apportés par les personnes : on considérera une personne assise en activité calme, avec une température ambiante de 20°C (température de consigne). Ainsi, chaque personne présente dans la pièce apportera à l'environnement qui l'entoure une part convective et radiative de 42,5 W.
  - Les gains apportés par l'éclairage : il existe sur TRNbuild, une librairie reprenant différents types de gains internes notamment liés à l'éclairage. Ne connaissant pas la nature de l'éclairage située dans le bâtiment administratif, on considérera donc des gains internes par défauts de 10W/m<sup>2</sup>, avec une part convective de 4 W/m<sup>2</sup> et une part radiative de 6 W/m<sup>2</sup>.
  - Les gains apportés par les équipements : Les gains apportés par les équipements dépendent fortement de l'utilisation de la pièce considérée. C'est-à-dire qu'ici, 3 types de gains liés aux équipements ont été sélectionnés : Les gains internes pour une cuisine avec une part radiative de 40 W/m<sup>2</sup> et une part convective de 160 W/m<sup>2</sup> ; Les gains internes pour des bureaux avec une part radiative de 1,4 W/m<sup>2</sup> et une part convective de 5,6 W/m<sup>2</sup> ; Les gains liés à un lieu de meeting (pour la salle de dégustation) avec une part radiative de 0,4 W/m<sup>2</sup> et une part convective de 1,6 W/m<sup>2</sup>.
- Pour le bâtiment industriel, il n'y a pas de gains internes considérés. En effet, étant donné que la seule pièce chauffée ici est la chambre chaude, et que cette dernière n'est presque jamais occupée puisqu'elle permet la garde de la bière, les gains sont considérés négligeables. De plus, après ajout de gains internes dans les pièces qui lui sont adjacentes et comparaison des résultats avec un scénario où il n'y a pas de gains internes, on constate que la différence entre les deux scénarios est très faible. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de compliquer la simulation.

## Zones

Chacune des zones thermiques possède un volume, une capacitance ainsi qu'une surface de plancher recalculé sur base des plans d'architecte. Cependant, la capacitance fournie par défaut lorsque lors de l'importation du modèle 3D dans TRNbuild représente celle d'une pièce vide. C'est-à-dire que :

- Pour les différentes zones thermiques du bâtiment administratif, il est nécessaire de multiplier la capacitance (exprimée en kJ/K) par 5, afin de prendre en compte les différents objets pouvant se trouver dans la pièce.
- Pour le bâtiment industriel, la démarche est un peu différente. Plutôt que de multiplier la capacitance par 5, on recalcule la capacitance en se basant sur les informations suivantes ;
  - a) A chaque brassin, la moitié est embouteillé et l'autre enfutée, sachant qu'un brassin vaut 35 hectolitres de bière, et que seules les bouteilles sont stockées dans la chambre chaude.
  - b) On suppose qu'il y a toujours l'équivalent de 4 brassins à la fois qui sont présent dans la chambre chaude. (Chaque brassin restant environ 2 semaines dans cette dernière)
  - c) Pour chaque brassin, 1750 litres de bière sont embouteillés, ce qui représente 5303 bouteilles de 33cl et 221 casiers composées de 24 bouteilles.

Ainsi, connaissant la masse pour chaque bouteille, casier et litre de bière, mais également la chaleur spécifique, on peut recalculer la capacitance de la chambre chaude. Les résultats ainsi que les valeurs utilisées pour les calculs sont repris dans le tableau suivant :

	Cp (J/kgK)	Masse pour une unité (kg)	Quantité présente dans la pièce (kg)	Capacitance (kJ/K)
<b>Bouteille</b>	720	0,241	5112	3681
<b>Casier</b>	1900	1,74	1538	2923
<b>Bière</b>	4000	1	7000	28000
<b>TOTAL =</b>				<b>34603</b>

On obtient donc une capacitance totale de 35213 kJ/K. En effet, il faut encore additionner le résultat du tableau du dessus, à la capacitance de la chambre chaude vide, qui vaut 610 kJ/K.

### Simulation TRNSYS

Une fois l'encodage effectué, on peut alors utiliser l'outil simulation studio. Simulation Studio est un environnement de simulation, permettant d'effectuer des études dynamiques pour divers systèmes dont notamment des bâtiments multizones et ce, à l'aide de composants appelés « TYPES ». Pour permettre de simuler la demande énergétique du bâtiment administratif et industriel, on a le choix entre créer son propre environnement de simulation ou bien partir d'un modèle préconstruit (template). Le second choix a été sélectionné. L'image ci-dessous permet de mettre en évidence l'environnement de simulation sur base duquel nous avons obtenu nos résultats. Le bâtiment est représenté via le type 56. A gauche, plusieurs inputs viennent se connecter au bâtiment, et permettent de fournir une série d'informations relatives à la météo de Saint-hubert. (Température du sol, température de l'air, rayonnements solaires...). A droite sont repris les différents outils utilisés pour exploiter les outputs provenant notamment du type 56. L'outil « calculatrice » est utilisé afin de convertir les unités, l'outil « intégrateur » permet d'intégrer les valeurs obtenues heure par heure afin d'obtenir la demande énergétique annuelle et finalement, le type 65-d est un plotter qui permet d'afficher graphiquement les outputs d'un composant, dont notamment ici la demande en énergie thermique de notre bâtiment.

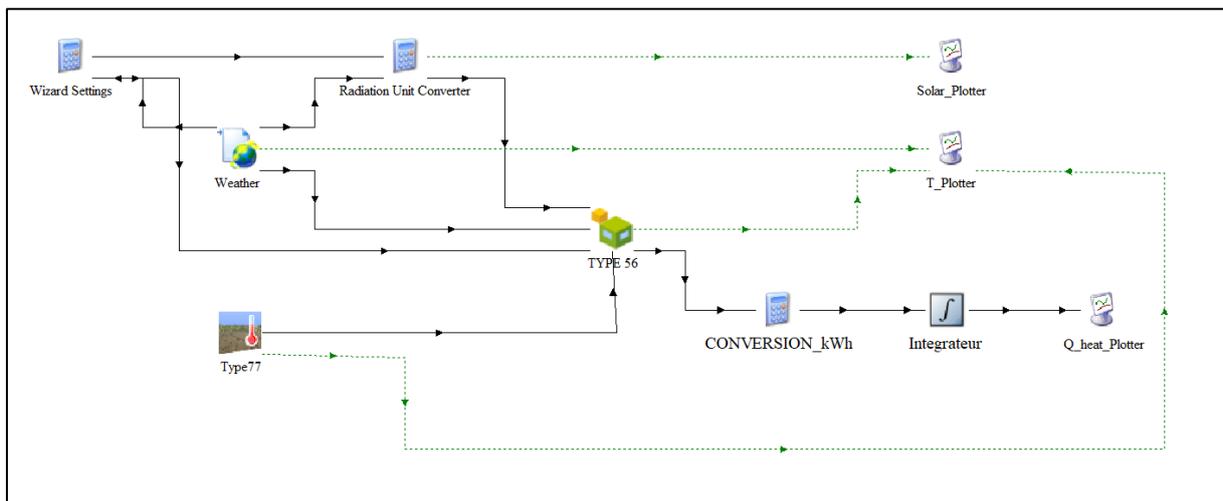


Figure 14 : Simulation de la demande en énergie thermique des bâtiments

### Calcul du besoin en chauffage pour le réchauffage de la bière

Lorsque la bière est envoyée dans la chambre chaude, elle ne se trouve pas directement à la température de 21°C. En effet, avant l'embouteillage elle subit un réchauffage jusqu'à la température de 14°C, mais il est nécessaire de fournir une quantité d'énergie supplémentaire afin de permettre de monter la bière jusqu'à la température de consigne. Ce sont les aérothermes qui se chargeront alors de fournir cette quantité d'énergie. Etant donné que la simulation du bâtiment industriel permet d'obtenir la demande de chauffage en se basant sur un bilan annuel entre les gains internes et les déperditions thermiques au travers de l'enveloppe de la chambre chaude, l'énergie nécessaire pour réchauffer chaque lot de bière entrant dans la chambre n'est pas considérée dans la demande. Il est donc nécessaire de la prendre en compte. Pour ce faire, on se base sur la même équation que celle utilisée pour la demande en énergie thermique du brassage et en eau chaude sanitaire. Les résultats sont repris dans le tableau suivant :

	Cp (J/kgK)	Masse pour une unité (kg)	Quantité par brassin (kg)	Energie nécessaire (kWh)
<b>Bouteille</b>	720	0,241	1278	1,79
<b>Casier</b>	1900	1,74	384	1,42
<b>Bière</b>	4000	1	1750	14,25
<b>TOTAL =</b>				<b>17,46</b>

Il est donc nécessaire de fournir 17,46 kWh d'énergie afin de réchauffer un brassin entrant dans la chambre chaude, en plus de l'énergie de chauffage permettant de maintenir la pièce à 21°C durant l'entièreté de la refermentation. Annuellement, cela représente alors 1,8 MWh.

#### V.1.1.1.1 Résultats des simulations

Les résultats de la demande en chauffage des différentes pièces sont repris dans le tableau suivant

Bâtiment	Zone thermique	Demande en énergie utile (MWh)	Demande en énergie finale (MWh)
<b>Bâtiment administratif</b>	Dégustation	5,96	6,55
	Cuisine	7,32	8,04
	Bureau/WC	6,95	7,63
	Bureau étage	6,51	7,15
<b>Bâtiment industriel</b>	Chambre chaude	18,32	22,9
<b>TOTAL</b>		<b>45,06</b>	<b>52,27</b>

Le demande en énergie finale pour le chauffage correspond à la demande en énergie utile divisée par le rendement de la chaudière à mazout, qui est différente pour le bâtiment administratif et le bâtiment industriel.

### *c. Installation d'un système solaire thermique pour la production d'eau chaude*

Maintenant que nous avons reconstitué la demande énergétique de la production d'eau chaude au sein de la brasserie, il peut être intéressant d'étudier la possibilité de l'ajout d'un système solaire thermique. Afin de connaître la surface de capteurs nécessaire ainsi que le ballon de stockage à installer, il faut passer par un dimensionnement de l'installation. Il existe plusieurs manières afin de dimensionner une installation solaire thermique ; manuellement, au moyen d'abaques ou encore, via un logiciel informatique. Pour effectuer le dimensionnement, plusieurs étapes ont été effectuées :

- Détermination du scénario de rénovation
- Choix de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux
- Calcul de la surface des capteurs nécessaire
- Détermination du volume de stockage
- Création d'un scénario de consommation
- Simulation du système solaire thermique
- Détermination des paramètres économiques

#### **Détermination du scénario de rénovation**

La solution la plus couramment utilisée dans les bâtiments actuellement pour une installation solaire thermique consiste à capter les rayons du soleil afin de produire de l'eau chaude sanitaire, via un chauffe-eau solaire (CES). Cependant, il existe également d'autres possibilités, comme notamment la production de chauffage combinée à la production d'ECS, on parle alors de « système solaire combiné » (SSC). Ici, nous nous concentrerons notamment sur la production en ECS pour la brasserie, mais nous verrons qu'il est possible de pousser l'étude plus loin.

On se base généralement sur la consommation journalière pour dimensionner une installation solaire thermique, et notamment pour choisir la capacité du ballon de stockage. Etant donné que les consommations estimées auparavant sont basées sur un profil hebdomadaire, il est donc nécessaire de redéfinir la consommation afin d'obtenir la demande pour une journée. Cependant, la brasserie artisanale de Rulles ne possède pas un planning constant, ce qui rend la tâche plus difficile. En effet, les opérations effectuées au sein de la brasserie sont très variables d'une semaine à l'autre, et il est donc impossible de recalculer la consommation exacte, sauf si on décide d'installer des compteurs à eau dans la brasserie. Par conséquent, le dimensionnement sera effectué sur base d'estimation, ce qui veut dire qu'il faut rester critique quant aux résultats qui seront générés lors des simulations.

Pour définir la quantité d'eau consommée par jour, et étant donné qu'il y a énormément d'eau chaude consommée pour le chauffage, les brassins et l'eau chaude sanitaire il faut d'abord définir les eaux que l'on désire chauffer via l'installation du système solaire thermique. Ainsi, l'objectif de l'installation consisterait à apporter autant d'énergie solaire que possible, pour la production de l'ECS destinée au bâtiment industriel mais également pour produire une partie

des eaux alimentaires utilisées pour les brassins, et notamment celles destinées au premier pallier de l'empilage. En effet, comme expliqué auparavant, actuellement, un mélange avec de l'eau de ville froide est nécessaire à plusieurs reprises afin de permettre d'obtenir la bonne quantité d'eau à la bonne température le jour d'un brassin, ce qui n'est pas efficient d'un point de vue énergétique.

Le nouveau concept serait donc le suivant ; des panneaux solaires thermiques se chargeraient de produire une partie des eaux alimentaire, en plus de l'eau chaude sanitaire nécessaire pour le réchauffage du mout, les CIP et la station de stérilisation des futs. C'est à dire que à la veille d'un brassin, plutôt que d'effectuer un mélange entre des eaux chaudes et froides, seuls les 2700 litres provenant du refroidissement après l'ébullition seraient destinés à être chauffés via le brûleur à gaz, qui devra alors fournir moins d'énergie par brassin, puisque les 1700 litres destinés au premier pallier de l'empilage seront préparés via l'énergie solaire et stockées dans un ballon. Le stockage étant indispensable en vue de l'intermittence de l'énergie solaire et du caractère discontinu du procédé de brassage.

Sur base de ce scénario, on sait alors que la quantité d'eau que l'on souhaite chauffer via l'énergie solaire s'élève à 7738 litres sur une semaine. (La quantité d'eau sanitaire nécessaire pour le bâtiment administratif étant négligée).

### **Détermination de l'inclinaison et de l'orientation des capteurs**

Afin d'exploiter de façon optimale l'énergie provenant du soleil, la surface de captage devrait toujours être orienté autant que possible de façon perpendiculaire au rayonnement. Cependant, comme la position du soleil par rapport à la terre varie au cours de la journée mais également de façon annuelle, l'angle d'incidence varie également. Ainsi, on a constaté que l'orientation optimale pour un capteur solaire correspondait à une orientation plein sud, alors que l'inclinaison optimale tournerait aux alentours de 45° à nos latitudes. De plus, il faut prêter attention à l'influence de l'ombrage apporté par les différents obstacles (arbres, lignes d'horizon, montagnes, ...) sur les surfaces considérées.

Pour la brasserie artisanale de Rulles, l'orientation des capteurs en plein Sud est possible mais il faut prendre en compte le fait que la brasserie dispose déjà d'une installation solaire photovoltaïque qui prend une place considérable (69 m<sup>2</sup>). L'image 15 permet de mettre en évidence cela.

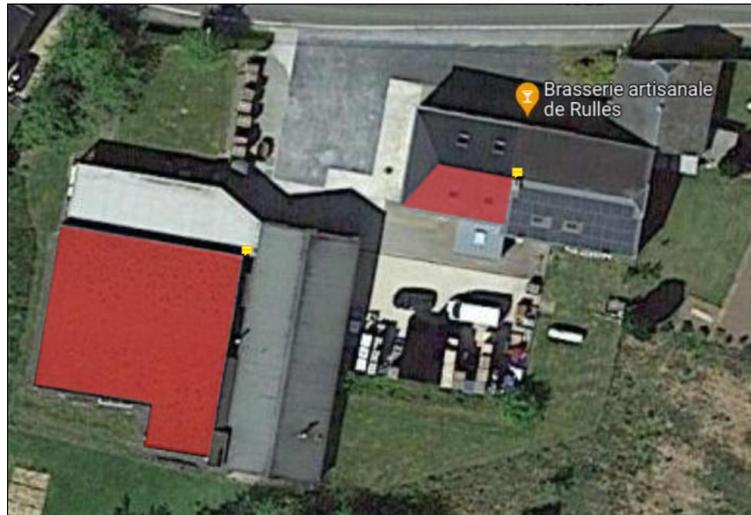
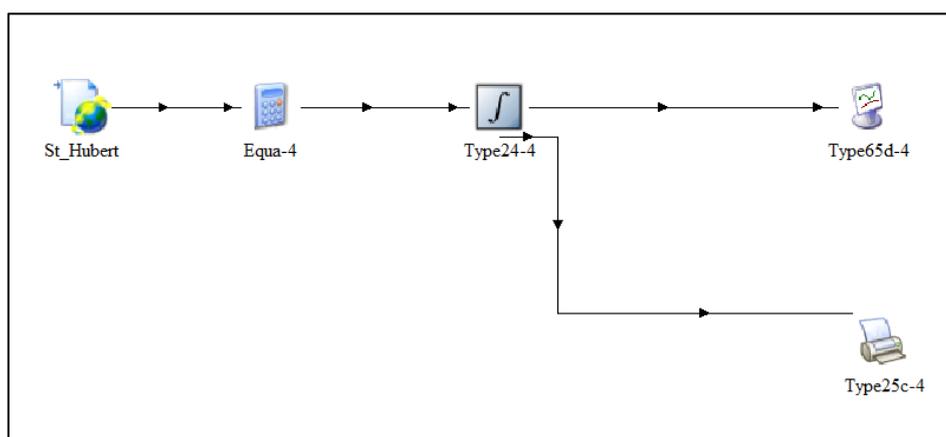


Figure 15 : Vue de haut de la brasserie de Rulles (google map)

La surface de la toiture avec une orientation plein sud encore disponible actuellement pour une installation de panneaux solaires thermiques est mise en évidence en rouge. On peut constater qu'une seconde surface est également mise en évidence. Celle-ci concerne la toiture végétalisée située au-dessus de l'extension du bâtiment industriel. L'avantage de cette toiture est qu'elle possède une surface plane, c'est-à-dire qu'il est possible de faire le choix de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux. L'inclinaison et l'orientation des panneaux ainsi que la superficie disponible sur les toitures considérées sont reprises ci-dessous :

- Toiture du bâtiment administratif : inclinaison de  $40^\circ$  plein sud et superficie de  $58 \text{ m}^2$ .
- Toiture végétalisée : les panneaux seront positionnés plein sud et la superficie totale est de  $337 \text{ m}^2$ . Concernant l'inclinaison, elle n'est pas directement imposée par la pente de la toiture, il est alors possible d'utiliser le logiciel Trnsys. Il nous permet de choisir l'inclinaison optimale, c'est-à-dire l'inclinaison pour laquelle l'énergie solaire incidente est la plus importante annuellement. Le fichier de simulation utile pour y parvenir est repris ci-dessous :



L'énergie surfacique solaire globale disponible pour la météo de Saint-Hubert est calculée en intégrant le rayonnement incident solaire et diffus sur une année, et en additionnant les deux valeurs obtenues après cette intégration. On teste alors plusieurs inclinaisons avec une variation de  $5^\circ$  à chaque simulation. Il en ressort que l'inclinaison optimale pour les panneaux sur la toiture végétalisée est de  $35^\circ$  permettant ainsi d'offrir

une énergie surfacique solaire de 1108,6 kWh par m<sup>2</sup> et par an, comparée à l'inclinaison imposée par la toiture du bâtiment administratif qui offre une énergie surfacique solaire de 1103,8 kWh par m<sup>2</sup> et par an.

Par suite des résultats fournis par cette simulation, on peut alors faire le choix de privilégier la pose sur la toiture végétalisée.

### **Détermination de la surface de capteurs solaires**

Afin de permettre d'effectuer une simulation, il est nécessaire de connaître la quantité de panneaux qu'il faut mettre en place sur la toiture de la brasserie. Pour ce faire, les informations suivantes ont été considérées :

- La couverture solaire optimale est généralement comprise entre 50 et 60% tout en faisant attention de couvrir 100% des besoins en eau chaude pendant la période estivale. La couverture solaire de 55% a donc été choisie.
- Etant donné que le rendement d'une installation solaire thermique tourne généralement entre 30 et 40%, un rendement de 30% a été considéré.
- Une perte par les tuyauteries de 5 % est également considérée. Les pertes de l'installation étant fonction de l'isolation, de la longueur et de la nature des tuyauteries.

En repartant de la quantité d'eau chaude hebdomadaire mais également de l'équation utilisée précédemment pour calculer les besoins énergétiques de la brasserie, on peut recalculer facilement l'apport énergétique qu'il faut afin de chauffer l'eau chaude sanitaire. Sachant que l'eau désirée s'élève à 60°C, que l'eau de ville est à une température moyenne de 10°C on obtient alors une quantité d'énergie de 450 kWh par semaine.

Etant donné que la couverture solaire représente la part d'eau chaude sanitaire qui est couverte par le solaire thermique sur une année, il est alors nécessaire de multiplier cette valeur par 52 afin d'obtenir la quantité de chaleur réellement nécessaire sur une année, soit 23405 kWh par an. Prenant en compte les pertes par les tuyauteries (multiplication de la consommation annuelle par 1 = pas de pertes et multiplication par 1,3 = beaucoup de pertes), cette valeur s'élève alors à 24575 kWh. Il s'agit ici de l'apport annuel effectif ( $Q_{eff}$ ).

Sachant qu'on veut une couverture solaire d'environ 55% ( $C_s$ ), on peut recalculer l'énergie à fournir par le chauffe-eau solaire ( $Q_{coll}$ ), via l'équation suivante :

$$Q_{coll} = Q_{eff} \cdot \frac{C_s}{100}$$

On obtient la valeur de 13516,4 kWh. Cependant le rendement de l'installation solaire thermique n'est pas encore considérée dans le résultat. Pour ce faire, il suffit de le diviser par celui-ci, qui rappelons-nous, est compris entre 30 et 40%. La quantité d'énergie solaire totale à capter par an via les panneaux solaires thermiques s'élève alors à 45054 kWh ( $Q_{tot}$ ).

Finalement, afin de connaître la superficie de panneaux nécessaires pour notre scénario, il faut prendre en compte l'énergie surfacique disponible sous nos latitudes. Pour ce faire, on peut repartir de la valeur obtenue lors de la simulation Trnsys, à savoir 1108,6 kWh/m<sup>2</sup>.an. On divise alors la quantité d'énergie solaire totale à capter ( $Q_{tot}$ ) par cette valeur.

Il est nécessaire de prévoir une surface de panneaux solaires thermiques de 40,6 m<sup>2</sup>. Il ne reste plus qu'à faire un choix auprès d'un fournisseur, ce qui permettra de connaître les dimensions des capteurs commercialisés et, en fonction de la surface d'un capteur, de définir la quantité de panneaux qu'il est nécessaire d'acheter.

### **Détermination du volume de stockage**

Le stockage est certainement la partie la plus importante. Il permet de pallier le caractère discontinu des énergies renouvelables mais également l'écart entre la production et les besoins. La détermination du volume de stockage doit donc se faire de façon précise. D'une part, la volume ne doit pas être trop petit, afin de ne pas limiter les gains solaires récupérables et

D'autre part, il ne faut pas qu'il soit trop grand si on désire avoir une montée en température suffisante (un ballon trop volumineux a beaucoup plus de pertes thermiques et est très long à chauffer). Idéalement, il faudrait que le ballon permette de se passer d'un chauffage d'appoint pendant la période estivale.

En générale, on considère que le ballon doit pouvoir stocker environ 30 à 40% d'une journée de consommation d'eau chaude journalière. Autrement dit, le volume consommée par jour doit être multiplié par 1,3 à 1,4 fois. La capacité fréquente des plus gros ballons étant de 5000 litres. Cependant, des ballons de cette taille peuvent amener à des problèmes d'espace en raison du besoin d'un échangeur interne de grande puissance. C'est pourquoi, dans certains cas il est préférable d'avoir recours à plusieurs ballons de stockage.

Sur base de ces informations et en partant du profil du scénario de consommation (représenté ci-après) on peut ainsi supposer qu'il faudrait à la brasserie un ballon de stockage avec un volume d'environ 2741 litres. En pratique, les choses sont un peu différentes. En effet, il faut tenir compte des équipements standards existants sur le marché.

### **Création d'un scénario de consommation**

La brasserie artisanale de Rulles ne possédant pas un planning de production bien établi, il est difficile d'effectuer une estimation de la consommation en eau, qui est très aléatoire d'une semaine à l'autre. C'est pourquoi, afin de permettre d'effectuer une simulation de la production solaire, il a fallu imaginer un scénario de production, qui sera alors considéré constant sur toute l'année. Le scénario de consommation à été crée sur base des considérations suivantes :

- Les brassins sont effectués tous les mardis et jeudis
- Le jour du brassage la cuve de fermentation destinée à contenir le brassin subit un nettoyage
- Le réchauffage du mout s'effectue tous les mercredis et vendredis
- Après chaque réchauffage, la cuve de garde, alors libérée, subit un nettoyage
- L'embouteillage et l'enfutage sont effectués tous les mercredis et vendredis, suivi d'un nettoyage de l'enfuteuse et de l'embouteilleuse
- Il n'y a pas de prélèvements d'eau chaude sanitaire les samedis, dimanches et lundis

Un tableau reprenant les valeurs de consommation en eau chaude sanitaire produite par le système solaire thermique envisagé permet de mieux visualiser cela.

Points de puisage	Consommation en eau pour chaque jour d'une semaine (litres)						
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Eaux alimentaires (1er palier empilage)		1700		1700			
CIP fermentation		60		60			
Réchauffage mout			1000		1000		
Enfuteuse			529		529		
CIP garde			130		130		
CIP enfuteuse/embouteilleuse			450		450		
<b>TOTAL</b>		<b>1760</b>	<b>2109</b>	<b>1760</b>	<b>2109</b>		

En additionnant le total des 4 jours de la semaine durant lesquels il y a une consommation, on retombe bien sur les 7738 litres qui ont été déterminés auparavant. Finalement, le logiciel Trnsys travaille généralement sur base de débits (exprimés en kg/h). Cependant, ne connaissant pas les débits réels de chaque point de puisage, une estimation a été réalisée en se basant sur les dires du propriétaire et surtout, sur une ancienne étude de la brasserie réalisée par le bureau d'ingénieur appelé « Sense Engineering ». Les débits sont repris ci-dessous :

Points puisage	Débits (m <sup>3</sup> /h)
Eaux alimentaires + CIP	1,4
Réchauffage mout	1,29
Enfuteuse	0,211

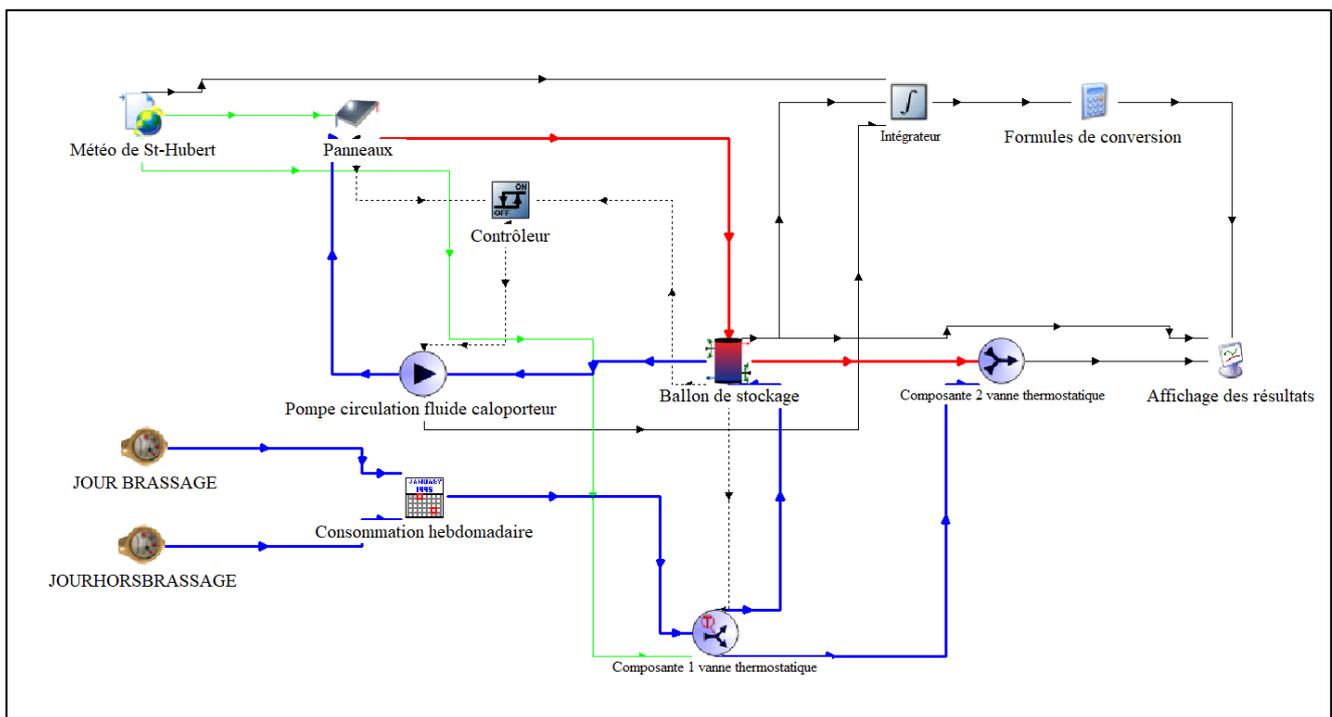
On considère 3 points de puisage pour le nouveau scénario. Les deux premiers ont été tirés de l'étude du bureau d'ingénieur alors que le dernier a été estimé, en partant du principe que l'enfuteuse est allumée 5 heures par semaines, soit 2h30 à chaque utilisation.

## Simulation du système solaire thermique

Sur base des informations précédentes, on peut alors créer un environnement de simulation Trnsys. Pour ce faire, il faut d'abord faire un choix auprès de fournisseurs d'équipements solaires thermiques afin d'obtenir les données utiles au paramétrage des « types » utilisés. L'équipement choisi est repris ci-dessous :

- Pour le ballon de stockage, étant donné qu'il s'agit d'un grand système solaire (> 30 m<sup>2</sup> de surface de capteur) des échangeurs de chaleur externes au ballon sont généralement utilisés. C'est pourquoi, le choix s'est porté sur un ballon sans échangeur (ballon tampon) multi-piquages de 2500 litres, de la marque « solaire diffusion ».
- Concernant les panneaux solaires thermiques, le choix s'est porté sur des capteurs plans Ecosolar avec une superficie d'entrée de 2,32 m<sup>2</sup>. Dès lors, on sait qu'il sera nécessaire d'utiliser 18 panneaux si on désire fournir assez de chaleur pour notre scénario.
- Il faut également prévoir une pompe de circulation. Le débit de la pompe a été déterminé sur base de la surface totale de capteurs (on considère généralement un débit 50 litres par heure et par m<sup>2</sup> de capteur même si la tendance actuelle vise à diminuer ce débit).

L'environnement de simulation ainsi créé est représenté via l'image suivante.



## Détermination des paramètres économiques

Afin d'effectuer une analyse économique d'un projet comme celui-ci, l'utilisation et la maîtrise du cours d'analyse technico-économique a été primordiale, notamment la partie théorique vue avec le professeur Abdelhamid Kheiri.[30] Les différents paramètres permettant de réaliser l'étude économique sont repris ici :

- Selon engie my power, la durée de vie des panneaux solaires thermiques pourrait aller entre 30 et 40 ans si l'entretien est correctement et régulièrement réalisé. Ainsi, on va considérer une durée de vie de 35 ans. [49]
- Considérant que la brasserie artisanale de Rulles est un particulier, le prix du propane lorsqu'il est acheté en vrac (en citerne) selon primagaz, s'élève à la date du 6/12/2023 à 0,7568 € par litre, TVA incluse. [47]
- L'inflation de l'énergie pour le gaz et le mazout est estimée à 1,5%. Cette valeur correspondant à la moyenne observée ces dernières années d'après la banque centrale européenne. [24]
- Selon le site « energieplus » on peut estimer le coût d'une installation solaire thermique à environ 1200 € par m<sup>2</sup> de capteurs. L'investissement de départ s'élèverait alors à 48720 €. [16]
- Selon le cours d'analyse technico-économique, en pratique, le taux d'actualisation serait égale au taux d'intérêt bancaire courant qui serait consenti à l'entreprise. C'est pourquoi, un taux d'intérêt de 4% a été retenu. [30]

Il existe également une initiative de la région wallonne appelée « SOLTHERM » afin de pousser au développement des chauffes eaux solaires. Ainsi, la région propose de fournir une prime s'élevant à 2500 euros pour les installations comprises entre 2 et 4 m<sup>2</sup> de capteurs ainsi que 200 euros par m<sup>2</sup> de capteurs supplémentaires, avec un plafond de 6000 euros et 50 % du montant de la facture HTVA. Il est également possible d'obtenir une déduction fiscale, qui s'élève à maximum 20,5 % pour les sociétés qui réalisent des investissements économiseurs d'énergie.

## VI. Résultats et discussion

---

Pour commencer, il peut être intéressant de rappeler les objectifs fixés au début de ce travail :

- Optimisation de la consommation énergétique de la brasserie artisanale de Rulles
- Analyse économique du scénario proposé

De plus, préalablement à la réalisation de ces objectifs, un long travail d'analyse et de reconstitution de la consommation en énergie thermique de la brasserie a été nécessaire.

Le présent point va permettre de reprendre les différents résultats obtenus tout au long du travail, de vérifier que les objectifs ont bien été atteints et finalement, d'apporter une critique de ces résultats.

### 1. Consommation annuelle en énergie thermique de la brasserie

La consommation en énergie thermique de la brasserie, qui a été reconstituée durant ce travail et destinée à la production des eaux chaudes alimentaires, les eaux chaudes sanitaires et finalement les eaux chaudes de chauffage, est reprise dans le tableau suivant :

Combustible	Objectif recherché	Consommations actuelles recalculées (MWh)	TOTAL (MWh)
Propane	Eaux chaudes alimentaires	70,87	70,87
Mazout	Eaux chaudes sanitaires indus.	16,4	69,07
	Chauffage bâtiment industriel	22,9	
	Eaux chaudes sanitaires admin.	0,403	
	Chauffage bâtiment administratif	29,37	
TOTAL			139,94

Tableau 11 : Consommation thermique annuelle de la microbrasserie de Rulles pour la production d'eau chaude

Les différents calculs et simulations effectués ont donc permis d'arriver à la conclusion que la brasserie artisanale de Rulles consomme annuellement 139,39 MWh d'énergie thermique pour la production d'eau chaude de la brasserie, sans compter la consommation en propane destiné à la production de vapeur pour la station de stérilisation des fûts.

Sachant que les consommations réelles en propane et en mazout sont respectivement de 17425 litres et de 6666 litres, représentant énergétiquement 115,5 MWh et 70,65 MWh, on peut considérer que la consommation pour la production de vapeur s'élève alors à 44,63 MWh par an. De plus, il est intéressant de constater que la valeur que nous avons recalculé pour la consommation en mazout se rapproche fortement de la valeur réellement consommée par la brasserie annuellement. En effet, en reconvertissant les 69,07 MWh de mazout en litre, on obtient alors, une consommation en mazout de 6516 litres.

## 2. Production annuelle de l'installation solaire thermique

Le présent point a pour objectif de présenter les résultats obtenus par suite de la simulation de l'installation solaire thermique et de les critiquer. Ces résultats sont repris dans le tableau suivant :

Energie considéré	Consommations (kWh)
Energie fournie par le solaire	14784
Energie fournie par l'appoint	12676
Energie totale consommée par l'ECS	26421
Pertes du ballon	1104
Energie fournie par le rayonnement incident	45084
Energie électrique consommée par la pompe	92,11

Tableau 12 : Résultats des consommations issus de la simulation Trnsys

On peut constater que l'installation solaire prévue permettrait de récupérer 14,78 MWh par an. Cela dit, un appoint, par exemple la chaudière à mazout qui se trouve dans le bâtiment industriel de la brasserie, est nécessaire afin de permettre de compenser les moments où il n'y aurait pas assez de rayonnements solaires incidents. Cette compensation est estimée à 12,67 MWh par an (sans prendre en compte le rendement de la chaudière)

En plus des consommations, il est possible de recalculer le rendement du capteur, le rendement global de l'installation et finalement, la fraction solaire (autrement appelé taux de couverture solaire).

<b>Rendement capteurs</b>	32,72 %
<b>Rendement global de l'installation</b>	45,67 %
<b>Fraction solaire</b>	52,02 %

Tableau 13 : Tableau reprenant les valeurs de rendement annuel de l'installation ainsi que la fraction solaire

Le rendement annuel du capteur est de 32,72 %, alors que celui de l'installation global est de 45,67%. La fraction solaire quant à elle, est de 52% sur une année.

Finalement, on peut observer graphiquement l'évolution du rendement global de l'installation, du rendement des capteurs et de la fraction solaire sur une année. C'est ce qui est représenté sur la figure 3. On peut voir que le rendement global (qui est fourni par la courbe bleu) a tendance à diminuer lorsqu'on s'approche de la période estivale, alors que la fraction solaire (représentée par la courbe rose) a tendance à augmenter en été. C'est-à-dire que lorsqu'on se trouve en été, la fraction solaire est plus importante mais étant donné que les rayonnements le sont également, il y a beaucoup plus de pertes thermiques. Si on désire pallier cette baisse de rendement, il faudrait alors rediriger les pertes vers un autre poste de consommation, afin d'optimiser au maximum la production de l'installation solaire thermique.

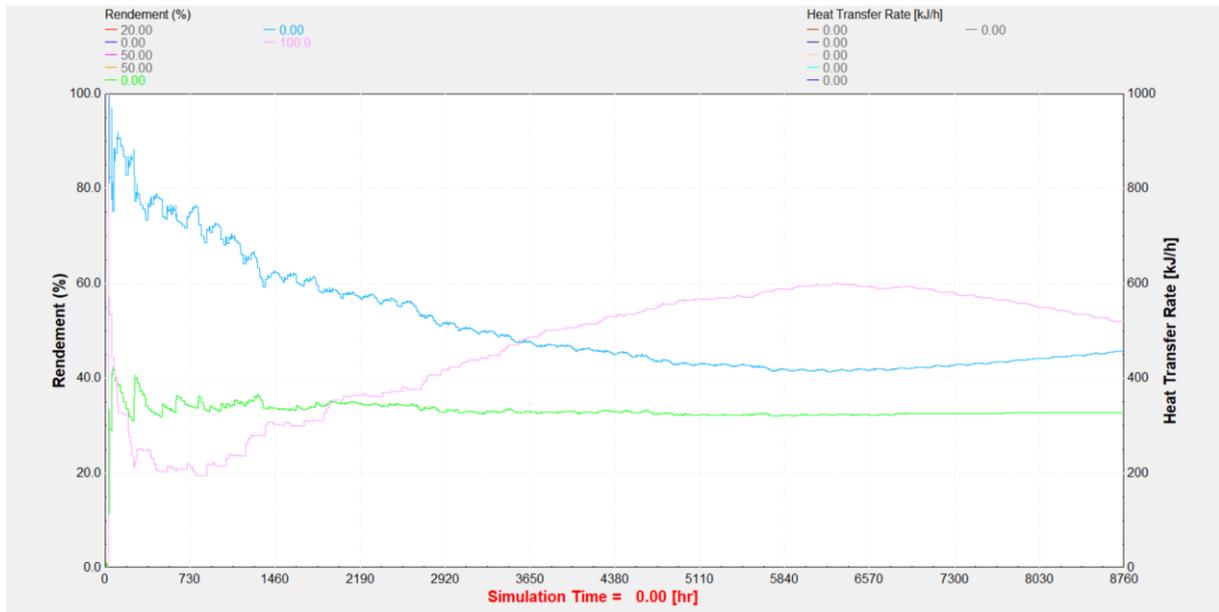


Figure 16 : graphique représentant l'évolution des rendements et de la fraction solaire sur une année

Au vu de ces résultats, l'objectif d'optimisation énergétique de la brasserie à été atteint.

### 3. Résultats de l'étude économique de l'installation

Sur base de la production solaire thermique annuelle, il est possible de recalculer la quantité de combustible économisée sur une année, qui nous permettra alors de connaître les recettes annuelles que l'entreprise effectuera, et ainsi calculer le temps de retour sur investissement de l'installation ainsi que la valeur actuelle nette. Le tableau suivant permet de reprendre l'étude économique ainsi obtenu :

Année	Prix fioul (€)	Prix propane (€)	Recettes (€)	PWF	PWF*R (€)	VAN
0	0.883	0.757	1638.57	1	0.00	-32,732.40 €
1	0.896	0.768	1663.15	0.961538462	1599.19	-31,133.21 €
2	0.909	0.780	1688.10	0.924556213	1560.74	-29,572.47 €
3	0.923	0.791	1713.42	0.888996359	1523.23	-28,049.25 €
4	0.937	0.803	1739.12	0.854804191	1486.61	-26,562.64 €
5	0.951	0.815	1765.21	0.821927107	1450.87	-25,111.76 €
6	0.965	0.828	1791.69	0.790314526	1416.00	-23,695.76 €
7	0.979	0.840	1818.56	0.759917813	1381.96	-22,313.81 €
8	0.994	0.853	1845.84	0.730690205	1348.74	-20,965.07 €
9	1.009	0.865	1873.53	0.702586736	1316.32	-19,648.75 €
10	1.024	0.878	1901.63	0.675564169	1284.67	-18,364.08 €
11	1.040	0.891	1930.16	0.649580932	1253.79	-17,110.28 €
12	1.055	0.905	1959.11	0.62459705	1223.65	-15,886.63 €
13	1.071	0.918	1988.50	0.600574086	1194.24	-14,692.39 €
14	1.087	0.932	2018.32	0.577475083	1165.53	-13,526.86 €
15	1.103	0.946	2048.60	0.555264503	1137.51	-12,389.34 €
16	1.120	0.960	2079.33	0.533908176	1110.17	-11,279.17 €
17	1.137	0.975	2110.52	0.513373246	1083.48	-10,195.69 €
18	1.154	0.989	2142.17	0.493628121	1057.44	-9,138.25 €
19	1.171	1.004	2174.31	0.474642424	1032.02	-8,106.24 €
20	1.189	1.019	2206.92	0.456386946	1007.21	-7,099.03 €
21	1.206	1.035	2240.03	0.438833602	983.00	-6,116.03 €
22	1.225	1.050	2273.63	0.421955387	959.37	-5,156.66 €
23	1.243	1.066	2307.73	0.405726333	936.31	-4,220.35 €
24	1.262	1.082	2342.35	0.390121474	913.80	-3,306.55 €
25	1.280	1.098	2377.48	0.375116802	891.83	-2,414.72 €
26	1.300	1.115	2413.14	0.360689233	870.40	-1,544.32 €
27	1.319	1.131	2449.34	0.34681657	849.47	-694.85 €
<b>28</b>	1.339	1.148	2486.08	0.333477471	829.05	134.20 €
29	1.359	1.165	2523.37	0.320651415	809.12	943.32 €
30	1.379	1.183	2561.22	0.308318668	789.67	1,733.00 €
31	1.400	1.201	2599.64	0.296460258	770.69	2,503.69 €
32	1.421	1.219	2638.64	0.28505794	752.16	3,255.85 €
33	1.442	1.237	2678.22	0.274094173	734.08	3,989.94 €
34	1.464	1.256	2718.39	0.26355209	716.44	4,706.37 €
35	1.486	1.274	2759.16	0.253415471	699.22	<b>5,405.59 €</b>

Tableau 14 : Analyse économique de l'installation solaire thermique

L'analyse économique permet de constater que le retour sur investissement de l'installation est de 28 ans et que la valeur actuelle nette après 35 ans est égale à 5405 euros. C'est-à-dire qu'il faudra 28 ans avant que le propriétaire de la brasserie récupère la totalité de l'argent investi au départ. De plus, la valeur actuelle nette calculée ici permet d'estimer les bénéfices qui seront engendré à la fin de la durée de vie de l'installation considérée, une fois que le temps de retour sur investissement sera atteint.

Malgré la prise en compte de la déduction fiscale et de la faible prime proposée par le gouvernement wallon, le temps de retour sur investissement reste considérable. La raison

principale réside dans le fait que le cout d'investissement d'une installation solaire thermique est très important, alors que la quantité d'énergie valorisable par une installation solaire thermique (max 400 kWh/m<sup>2</sup>.an équivalent à une économie d'environ 30 à 40 litres de fioul par m<sup>2</sup>) reste assez faible puisque le rendement tourne autour de 30 à 40%. C'est-à-dire qu'en vue des prix élevés des panneaux, qui s'élève à près de 600€/m<sup>2</sup>, seul 26 à 35 euros/m<sup>2</sup> seront économisés.

De plus, l'analyse économique ne tient pas compte de certains aménagements technique préalable à l'installation des panneaux, tel que la dévégétalisation de la toiture par exemple.

Certes, les résultats économiques de l'installation ne sont pas très encourageants. Néanmoins, il ne faut pas négliger la diminution de l'impact environnementale de la brasserie qui, à la suite de ce scénario, permet tout de même d'économiser environ 2000 litres de propane et 50 litres de mazout, en plus des rejets de CO<sup>2</sup> engendrés lors de la combustion.

Bien que les résultats de l'étude ne soient pas satisfaisants, le second objectif visant à analyser le scénario de rénovation proposé à été atteint.

#### 4. Perspectives

Maintenant que nous avons créé l'environnement de simulation de l'installation, il pourrait être intéressant de jouer sur plusieurs paramètres. Par exemple, la modification de la taille du ballon de stockage pourrait permettre d'optimiser la fraction solaire et ainsi diminuer l'apport énergétique supplémentaire fourni par la chaudière à mazout.

En outre, au constat de la place considérable disponible sur la toiture, mais également du fait que la chaudière située dans le bâtiment administratif est basée sur un fonctionnement à basse température, une autre possibilité s'offre à nous. En effet, il pourrait être intéressant d'étudier l'éventualité de la mise en place d'un système solaire thermique combiné (SSC) qui viserait à concilier la production pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage. Cela dit, au vu de l'architecture de type vernaculaire, il faudrait d'abord envisager des travaux d'amélioration de l'isolation du bâtiment, afin de limiter les déperditions énergétiques, ce qui renforcerait d'autant plus l'optimisation économique.

Il existe également d'autres solutions que le solaire thermique pour améliorer la consommation énergétique d'une brasserie. Par exemple, la condensation des vapeurs provenant de l'ébullition du moût constitue une source d'énergie non négligeable. De fait, un litre de vapeur condensé en un litre d'eau à 100°C permet de récupérer 2260 kJ. A l'échelle de la brasserie artisanale de Rulles, cela représenterait alors un potentiel de récupération de 13 MWh par an.

## VII. Conclusion

---

En conclusion, il est intéressant de revenir sur le premier objectif de ce travail, qui cherchait à apporter une amélioration de l'empreinte environnementale des secteurs les plus demandeurs, notamment du secteur agroalimentaire et plus spécifiquement des microbrasseries, en constante augmentation. Pour atteindre les objectifs de la commission européenne visant à dissocier croissance économique et utilisation des ressources mais surtout afin de parvenir à l'absence d'émissions net de CO<sub>2</sub> une étude approfondie demeure primordiale, afin d'apporter des solutions spécifiques à chaque cas.

L'utilisation de l'énergie solaire thermique s'avère être une solution intéressante pour le secteur brassicole, connu notamment pour sa forte demande de chaleur. Le second objectif de ce travail visant à imaginer et mettre en place un scénario d'optimisation énergétique de la microbrasserie de Rulles via le recours à l'énergie solaire a été atteint, en intégrant 18 panneaux solaire thermiques sur la toiture du bâtiment industriel. En conclusion, cette initiative permet une économie annuelle d'environ 2100 litres de combustibles fossiles.

Finalement, le dernier objectif de ce travail consistant à réaliser une analyse économique du scénario proposé, a révélé que cette installation présente un temps de retour sur investissement significatif, estimé à 28 ans, principalement en raison d'un coût d'investissement élevé. Bien que des initiatives d'aide visant à encourager l'adoption du solaire thermique existent, celles-ci ne semblent cependant pas suffisantes en vue de l'énergie récupérable via le soleil. Malgré cela, il ne faut tout de même pas négliger les économies engendrées par l'installation et surtout la diminution de l'impact environnemental.

## VIII. Bibliographie

---

- [1] *Annual report-2022*. (s. d.). [Belgian Brewers]. Belgian Brewers. Consulté 10 juillet 2023, à l'adresse <http://www.belgianbrewers.be/en/economy/article/annual-report>
- [2] *Belgian Brewers—Economy*. (s. d.). Belgian Brewers - Economy. Consulté 9 octobre 2023, à l'adresse <http://www.belgianbrewers.be/en/economy/>
- [3] Bellenguez, M. (2022). *Etude d'une modification du processus de brassage de la bière* [Junia-ISa-Lille].  
[https://drive.google.com/file/u/0/d/1s218dRW8y3v0YDZplOHDI\\_KBp-zieZuq/view?fbclid=IwAR0JRFHxwyLYfGgrRBHjZo0Rm0NEJPejOZk\\_74zi5insspNUg6ecM0BGi1k&pli=1&usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/u/0/d/1s218dRW8y3v0YDZplOHDI_KBp-zieZuq/view?fbclid=IwAR0JRFHxwyLYfGgrRBHjZo0Rm0NEJPejOZk_74zi5insspNUg6ecM0BGi1k&pli=1&usp=embed_facebook)
- [4] Branger, A. (2004). Fabrication de produits alimentaires par fermentation : L'ingénierie. *Fabrication de produits alimentaires par fermentation: l'ingénierie*, F2(F3501), 1-17.
- [5] Brewers Association. (2014). Energy Usage, GHG Reduction, Efficiency and Load Management Manual. Brewers association.  
<https://www.brewersassociation.org/educational-publications/energy-sustainability-manual/>
- [6] Broggi, O. (s. d.). *Bouclage ECS : Dimensionnement et implantation optimisés*. XPair. Consulté 6 janvier 2024, à l'adresse  
[https://conseils.xpair.com/consulter\\_parole\\_expert/bouclage-ecs-dimensionnement-implantation.htm](https://conseils.xpair.com/consulter_parole_expert/bouclage-ecs-dimensionnement-implantation.htm)
- [7] *Calcul de rendement, la méthode la française*. (s. d.). Guidenr solaire thermique, l'information solaire thermique. Consulté 16 décembre 2023, à l'adresse  
[https://www.solairethermique.guidenr.fr/I\\_rendement-capteur-solaire-thermique-methode-francaise.php](https://www.solairethermique.guidenr.fr/I_rendement-capteur-solaire-thermique-methode-francaise.php)
- [8] *Calcul des besoins calorifiques et frigorifiques en brasserie*. (2023, avril 20). BtoBeer.  
<https://www.btobeer.com/themes-conseils-techniques-bieres-brasseries/conseils-carbonatation-process-et-analyses/calcul-besoins-calorifiques-frigorifiques-biere-brasserie>
- [9] *Capteur solaire à eau chaude*. (2010, septembre 22). Energie Plus. <https://energieplus-lesite.be/techniques/eau-chaude-sanitaire11/differents-preparateurs/capteur-solaire-a-eau-chaude-d1/>
- [10] Carvajal-Mariscal, I., De León-Ruíz, J. E., Belman-Flores, J. M., & Salazar-Huerta, A. (2022). Experimental evaluation of a thermosyphon-based waste-heat recovery and reintegration device: A case study on low-temperature process heat from a microbrewery plant. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101760.  
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101760>
- [11] *Chauffe-eau solaire individuel, Mise en œuvre des capteurs*. (s. d.). Guidenr solaire thermique, l'information solaire thermique. Consulté 2 août 2023, à l'adresse  
[http://www.solairethermique.guidenr.fr/VI\\_cesi-capteurs.php](http://www.solairethermique.guidenr.fr/VI_cesi-capteurs.php)
- [12] *Chauffe-eau solaire (personnes morales)*. (s. d.). Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté 7 janvier 2024, à l'adresse

<https://energie.wallonie.be/fr/chauffe-eau-solaire-a-partir-du-1er-avril-2015-personnes-morales.html?IDC=7029&IDD=101476>

- [13] Commission Européenne. (2019). *Le pacte vert pour l'Europe*. Commission Européenne. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
- [14] Commission Européenne. (2019). *Le pacte vert pour l'Europe- Annexe*. Commission Européenne. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
- [15] *Concevoir l'étanchéité à l'air*. (2015, juin 24). Energie Plus. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/etancheite-a-l-air2/concevoir-l-etancheite-a-l-air/>
- [16] *Considérer l'aspect économique [ECS par capteurs solaires]*. (2010, septembre 2). Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/eau-chaude-sanitaire3/choisir-un-prechauffage-par-capteurs-solaires-thermiques/considerer-l-aspect-economique/>
- [17] *Consommation d'eau chaude sanitaire*. (2007, septembre 25). Energie Plus. <https://energieplus-lesite.be/donnees/consommations2/consommation-d-eau-chaude-sanitaire/>
- [18] *Déduction pour investissement : Quels taux d'une année à l'autre ?* (s. d.). Trigone Conseil. Consulté 8 janvier 2024, à l'adresse <https://www.trigone-conseil.be/actualites/lactu-des-poles/deduction-pour-investissement-202-a-quel-pourcentage-avez-vous-droit.html>
- [19] *Définition : Technique du bâtiment*. (2021, mai 10). Concretise. <https://concretise.ch/glossaire/technique-du-batiment/>
- [20] *En quoi consiste un Audit énergétique ?* (2022, avril 12). Green systèmes. <https://www.greensystemes.com/actualites-du-monde-de-lenergie/audit-energetique/>
- [21] Faiveley, M. (2010). Fabrication des bières. *Agroalimentaire*, F2(V6205), 1-29. <https://doi.org/10.51257/a-v1-f6205>
- [22] *Guide PEB 2015*. (2015). Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté 17 décembre 2023, à l'adresse [https://energie.wallonie.be/fr/08-02-difference-entre-v50-v50-et-n50.html?IDC\\_PEB=9491&IDD=113676&IDC=9095](https://energie.wallonie.be/fr/08-02-difference-entre-v50-v50-et-n50.html?IDC_PEB=9491&IDD=113676&IDC=9095)
- [23] *Guide PEB 2018*. (2018). Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté 24 décembre 2023, à l'adresse [https://energie.wallonie.be/fr/05-01-volume-protege-v.html?IDC\\_PEB=9652&IDD=135292&IDC=9762](https://energie.wallonie.be/fr/05-01-volume-protege-v.html?IDC_PEB=9652&IDD=135292&IDC=9762)
- [24] *HICP - Overall index*. (2023, Decembre 19). Banque centrale européenne. Consulté 7 janvier 2024, à l'adresse <https://data.ecb.europa.eu/data/datasets/ICP/ICP.M.U2.N.000000.3.ANR>
- [25] *Installation solaire thermique*. (2023, mars 1). Viessmann. <https://www.viessmann.be/fr/tout-savoir/technologies/capteurs-solaires.html>
- [26] *Installations photovoltaïques en toitures plates et inclinées*. (s. d.). Guide Bâtiment Durable. brussels. Consulté 4 janvier 2024, à l'adresse <https://www.guidebatimentdurable.brussels/installations-photovoltaïques-toitures-plates-inclines>

- [27] *Introduction à l'énergie photovoltaïque.* (s. d.). AROS Solar Technology. Consulté 29 décembre 2023, à l'adresse <https://www.aros-solar.com/fr/l%E2%80%99energie-solaire-une-solution-intelligente-au-service-de-l%E2%80%99environnement>
- [28] *Isolation thermique Superwool Plus.* (s. d.). Isolation thermique Superwool Plus. Consulté 7 décembre 2023, à l'adresse <https://www.isotec-isolierungen.de/Isolation-thermique-Superwool-Plus>
- [29] Jolibert, F. (2023). Le secteur de la malterie-brasserie, ses consommations et performances énergétiques. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire.* <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/energie-economie-et-environnement-42593210/la-maitrise-de-l-energie-en-malterie-et-brasserie-be7006/le-secteur-de-la-malterie-brasserie-ses-consommations-et-performances-energetiques-be7006niv10001.html>
- [30] Kheiri, A. (2022). Analyse technico-économique des systèmes énergétiques : Théorie et projet. Press Universitaire de Liège.
- [31] *Laine de verre | Matériau d'isolation.* (8 décembre). De Isolatieshop. <https://www.isolatiemateriaal.be/fr/laine-de-verre>
- [32] *L'architecture vernaculaire, qu'est-ce que c'est ?* (s. d.). Trouver mon architecte. Consulté 30 juin 2023, à l'adresse <https://www.trouver-mon-architecte.fr/actualites/l-architecture-vernaculaire-qu-est-ce-que-c-est>
- [33] *Le marché mondial de la bière.* (s. d.). Statista. Consulté 12 juillet 2023, à l'adresse <https://fr.statista.com/themes/9749/le-marche-mondial-de-la-biere/>
- [34] *Le rayonnement solaire.* (s. d.). AROS Solar Technology. Consulté 29 décembre 2023, à l'adresse <https://www.aros-solar.com/fr/le-rayonnement-solaire>
- [35] *Le rôle du système CIP dans les équipements de brasserie.* (2022, janvier 21). Micet Craft. <https://www.micetcraft.com/fr/le-role-du-systeme-cip-dans-les-equipements-de-brasserie/>
- [36] Mabièrteartisanale.Fr. (2019, avril 12). Fabrication de la bière : Les principales étapes. *Le Figaro.* <https://avis-vin.lefigaro.fr/biere/biere-artisanale/o140848-fabrication-de-la-biere-les-principales-etapes-ma-biere-artisanale>
- [37] Microbrasserie—Définitions, synonymes, prononciation, exemples. (s. d.). Le Robert dico en ligne. Consulté 9 octobre 2023, à l'adresse <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/microbrasserie>
- [38] *Panneau solaire thermique fonctionnement : Ce qu'il faut savoir.* (s. d.). Nouvel R Energie. Consulté 2 août 2023, à l'adresse <https://www.nouvelr-energie.com/pv/panneau-solaire-thermique-fonctionnement>
- [39] *Panneau solaire thermique : Infos et prix en 2024.* (s. d.). Bobex. Consulté 6 janvier 2024, à l'adresse <https://www.bobex.be/fr-be/panneaux-solaires/panneau-solaire-thermique/>
- [40] Pino, A., Lucena, F. J. P., & Macho, J. G. (2019). Economic Analysis for Solar Energy Integration in a Microbrewery. *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SEST.2019.8849128>

- [41] Pino, A., Pino, F. J., & Guerra, J. (2023). Integration of solar energy in Small-scale Industries : Application to microbreweries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103-276. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103276>
- [42] *Porte industrielle Design-Line*. (2018, avril 4). [Text]. Access systems. <https://www.access-systems.be/fr/design-line-industrielle>
- [43] *Prédimensionner une installation sanitaire tertiaire*. (2007, septembre 25). Energie Plus. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/eau-chaude-sanitaire3/concevoir-globalement-ecs/predimensionner-une-installation-sanitaire-tertiaire/>
- [44] *Présentation des bières de la Brasserie de Rulles*. (s. d.). Brasserie Artisanale de Rulles. Consulté 4 mai 2023, à l'adresse <http://brassriederulles.be/les-bieres/>
- [45] *Prime pour l'installation d'un chauffe-eau solaire (prime Soltherm—Ancien régime)*. (s. d.). Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté 8 janvier 2024, à l'adresse <https://energie.wallonie.be/fr/prime-pour-l-installation-d-un-chauffe-eau-solaire-prime-soltherm-ancien-regime.html?IDC=7029&IDD=126442>
- [46] *Prix du mazout en Belgique*. (s. d.). Mazoutonline.be. Consulté 7 janvier 2024, à l'adresse <https://www.mazout-on-line.be/fr/prix-du-mazout-en-belgique/>
- [47] *Quel est le prix officiel du gaz propane en Belgique actuellement ?* (s. d.). Primagaz. Consulté 7 janvier 2024, à l'adresse <https://www.primagaz.be/fr-be/faq/faq-paiements/faq-prix/quels-sont-les-prix-actuels-du-gaz-propane-en-frac>
- [48] *Quel prix pour un capteur solaire thermique ?* (s. d.). Quelle énergie par Effy. Consulté 18 décembre 2023, à l'adresse <https://www.quelleenergie.fr/prix-travaux/equipements-annexes/capteur-solaire-thermique>
- [49] *Quelle est la durée de vie d'un panneau solaire ?* (s. d.). Engie. Consulté 7 janvier 2024, à l'adresse <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/duree-vie-panneau-solaire.html>
- [50] *Quelles sont les méthodes d'installation solaire?* (2023, janvier 16). Bauer Energie. <https://bauerenergie.lu/quelles-sont-les-methodes-d'installation-solaire/>
- [51] *Qu'est-ce que le rayonnement ?* (s. d.). Guidenr photovoltaïque. Consulté 30 décembre 2023, à l'adresse [https://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations\\_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/definition-rayonnement.php](https://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/definition-rayonnement.php)
- [52] *Rayonnement global*. (s. d.). EDF ENR. Consulté 29 décembre 2023, à l'adresse <https://www.edfenr.com/lexique/rayonnement-global/>
- [53] *Réalisation audit énergétique Industrie et Tertiaire*. (s. d.). ACSIO Energie. Consulté 18 novembre 2023, à l'adresse <https://www.acsio-energie.com/audit-energetique>
- [54] *Rendement d'une installation solaire thermique*. (2010, août 27). Energie Plus. <https://energieplus-lesite.be/theories/eau-chaude-sanitaire12/rendement-d-une-installation-solaire-thermique/>
- [55] Scheller, L., Michel, D., & Funk, U. (2008). Efficient Use of Energy in the Brewhouse. *Technical Quarterly*, 45. <https://doi.org/10.1094/TQ-45-3-0263>
- [56] Sturm, B., Hugenschmidt, S., Joyce, S., Hofacker, W., & Roskilly, A. P. (2013). Opportunities and barriers for efficient energy use in a medium-sized brewery. *Applied*

- [57] *The Brewers of Europe*. (s. d.). The Brewers of Europe. Consulté 9 octobre 2023, à l'adresse <https://brewersofeurope.eu/about-us/the-brewers-of-europe/>
- [58] The Brewers of Europe. (2002). *Guidance Note for establishing BAT in the brewing industry*. Communauté du travail des Brasseurs du Marché Commun. <https://docplayer.net/27092569-The-brewers-of-europe.html>
- [59] TRNSYS, logiciel expert pour la simulation énergétique dynamique 100% flexible. (s. d.). Batiweb. Consulté 3 août 2023, à l'adresse <https://www.batiweb.com/produit-btp/www.batiweb.com>
- [60] *Utiliser la méthode unifiée d'audit pour le tertiaire et l'industrie—AMURE*. (s. d.). Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté 22 juillet 2023, à l'adresse <https://energie.wallonie.be/fr/methode-d-audit-tertiaire-et-industrie.html?IDC=9571>
- [61] Vronen, M. (2020). *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*. Université de Liège.
- [62] Zogla, L., Zogla, G., Beloborodko, A., & Marika, R. (2015). *Process benchmark for evaluation energy performance in breweries*. *Energy Procedia*, 202-208(72). <https://www.researchgate.net/publication/282555872> [Process Benchmark for Evaluation Energy Performance in Breweries](#)